

00376



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIAS
BIOLÓGICAS**

FACULTAD DE CIENCIAS

**ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN POR ARSÉNICO EN
AGUA, SUELO Y PLANTAS DE LA REGIÓN DEL CABO
EN BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS
(ECOLOGÍA Y CIENCIAS AMBIENTALES)**

P R E S E N T A

ALEJANDRA NARANJO PULIDO

DIRECTOR DE TESIS: DR. ALFREDO ORTEGA RUBIO

MÉXICO, D.F.

ABRIL 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. y a su director general Dr. Mario Martínez García.

Al Proyecto CONACYT-SEMARNAT 2002-C01-0844.

Al mi director de tesis, el Dr. Alfredo Ortega Rubio por su amistad, apoyo y orientación incondicional, además por ser parte fundamental del convenio CIBNOR-UNAM.

Al Dr. Alejandro Carrillo Chávez, Dra. Lia Méndez Rodríguez, Dra. Norma Eugenia García Calderón y Dra. Silke Cram Hieke, por aceptar ser parte de mi Comité Académico y por todas sus valiosas aportaciones.

A la Dra. Margarita Collazo Ortega, por su amistad, ayuda y orientación, además de ser parte importante en el convenio CIBNOR-UNAM.

Al Técnico Baudilio Acosta por su amistad y su ayuda incondicional en el análisis de las muestras.

Al Técnico Marcos Acevedo Beltrán por su amistad y su ayuda en el campo.

A Ale Nieto, Carmen Mercado, Paty Cortes, por su invaluable e incondicional amistad.

A Mamá Fina, Fede, Heidi, Lolita, Aradit, Sarita, Paty, Sergio, Yoly, Aurora, Rocío y Ticul por ser mis queridos amigos de La Paz.

A Verito y su familia por amistad y cariño.

A mis padres por ser parte de las personas que mas amo.

A mi "peque" Aguilar por permitirme crecer a su lado y por seguir siendo parte esencial de mi.

A mi morena y a mi nany por su amor y por enseñarme a ser madre.

A mis hermanos, cuñados, cuñadas y sobrinos por todo lo que son y representan para mí.

A Adriana por su guía y motivación.

A mi Dios.

Índice general

1. INTRODUCCION	10
1.1 ASPECTOS GENERALES SOBRE EL ARSENICO.	16
1.1.1 Fuentes de Exposición.	17
1.1.2 Toxicidad.	18
1.1.3 Relación entre el pH y el tipo de arsénico presente en agua.	19
1.1.4 Indicadores de Exposición.	20
1.1.5 Establecimiento de límites.	21
1.2. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO.	22
1.2.1 Ubicación.	22
1.2.2 Clima.	23
1.2.3. Geología.	24
1.2.4 Topografía.	26
1.2.5 Suelo.	26
1.2.6 Vegetación.	28
2. OBJETIVOS	30
2.1 Objetivo General:	30
2.2 Objetivos Particulares:	30
3. MATERIALES Y METODOS	32
3.5 Trabajo de laboratorio.	38
3.5.1 Agua.	38
3.5.2 Suelo.	38
3.5.3 Plantas.	41
4. METODOLOGIA GENERAL PARA LA DETERMINACION DE ARSENICO.	42
5. ANÁLISIS ESTADISTICOS.	47
6. RESULTADOS	48
6.1 Agua.	48
6.1.1 Correlación entre el pH de los pozos de agua con la concentración de arsénico.	48
6.1.2. Diferencias entre concentración de arsénico por pozo.	48
6.1.3. Diferencias entre la concentración de arsénico por poblado.	49
6.2 Suelo.	54
6.2.1 Propiedades físicas de los suelos.	54
6.2.2. Propiedades Químicas de los suelos.	58
6.3 Vegetación.	65
6.3.1. Diferencias en la concentración de arsénico por poblado.	65
6.3.2 Diferencias entre las concentraciones de arsénico por estructura vegetativa. .	65
6.3.3. Diferencias entre la concentración de arsénico por especie.	68

7. DISCUSION	71
7.1. Agua.	71
7.2. Suelo.	72
7.3. Vegetación.	74
8. CONCLUSIONES.	76
9. RECOMENDACIONES.	77
10. LITERATURA CITADA.	78

Índice Cuadros

Cuadro 1. Contenidos normales y límites permisibles para las diferentes matrices ambientales	21
Cuadro 2. Distribución de las muestras de Agua.	35
Cuadro 3. Distribución de las muestras de Suelo.	36
Cuadro 4. Distribución de las muestras de Vegetación.	37
Cuadro 5. Valores calculados para la pendiente (a) y el origen (b) del agua, suelo y plantas.	45
Cuadro 6. Ubicación de los pozos de agua y medias de los análisis químicos del agua	51
Cuadro 7. Análisis de Grupos Homogéneos (LSD) para las medias de concentración de arsénico por pozos de agua.	52
Cuadro 8. Análisis de Grupos Homogéneos (LSD) para las medias de la concentración de arsénico por poblado.	52
Cuadro 9. Resultados de las propiedades físicas del suelo.	57
Cuadro 10. Propiedades químicas del suelo.	61
Cuadro 11. Medias de la fracción biodisponible de arsénico por pozo edafológico	62
Cuadro 12. Análisis de Grupos Homogéneos (LSD) para las diferencias entre la fracción biodisponible de arsénico por pozo edafológico.	62
Cuadro 13. Análisis de Grupos Homogéneos (LSD) para las diferencias entre la fracción biodisponible de arsénico por poblados.	63
Cuadro 14. Análisis de Grupos Homogéneos (LSD) para las diferencias entre la fracción biodisponible de arsénico por profundidades.	63
Cuadro 16. Análisis de Grupos Homogéneos (LSD) para las diferencias entre las concentraciones de arsénico en la vegetación de San Antonio, El Triunfo y El Comitán.	68
Cuadro 17. Análisis de Grupos Homogéneos (LSD) para las diferencias entre las concentraciones de arsénico por estructura vegetativa.	68
Cuadro 18. Análisis de Grupos Homogéneos (LSD) para las diferencias entre las concentraciones de arsénico por especie.	69

Índice Figuras

Figura. 1 Relacion entre el pH y el tipo de arsénico presente en el agua	20
Figura. 2 Ubicación del Area de Estudio	22
Figura 3. Geología del Bloque Cabo San Lucas (Modificado de Carrillo, 1990)	24
Figura 4. Mapa de la distribución de los suelos dentro del área de estudio	28
Figura 5. Localización de los desechos mineros, Plantas de procesamiento minero en San Antonio - El Triunfo	33
Figura. 6 Metodología para la determinación de arsénico	46
Figura. 7 Correlación del pH de los pozos de agua y la concentración de arsénico	53
Figura. 8 Promedio de la concentración de arsénico por pozo	53
Figura. 9 Promedio de la concentración de arsénico por poblado	54
Figura. 10 Promedio de la fracción biodisponible de arsénico por perfil edafológico,	63
Figura. 11 Promedio de la fracción biodisponible de arsénico en el suelo por población,	64
Figura. 12 Promedio de la fracción biodisponible de arsénico a diferentes profundidades	64
Figura. 13 Promedio de la concentración de arsénico por poblado	69
Figura. 13 Promedio de la concentración de arsénico estructura vegetativa	70
Figura. 13 Promedio de la concentración de arsénico por especie vegetal	70

RESUMEN

En el presente trabajo se determina la cantidad de arsénico en agua subterránea y plantas del distrito minero San Antonio – El Triunfo (SA-ET), así como la fracción biodisponible de este elemento en el suelo para tres especies de plantas forrajeras de la región; tomando como puntos de muestreo los principales pozos de agua que abastecen a SA-ET y comparando estos resultados con el poblado de El Comitán, el cual se utilizó como testigo por no estar dentro del área que abarca este distrito.

Dentro de este distrito existen dos fuentes principales de aportación de arsénico al medio ambiente. 1) El geológico debido al intemperismo de los minerales sulfurosos de vetas de pirita, calcopirita y arsenopirita que liberan cantidades considerables de arsénico y ácido sulfúrico al agua subterránea de la región y 2) El antropogénico, debido a la actividad minera cuyos desechos presentes en la zona contienen arsenolita (AsO_3).

En el poblado de San Antonio se analizaron 6 pozos de agua, 2 en El Triunfo y 1 en El Comitán, siendo un total de 9 pozos. De cada uno de estos pozos se tomaron 3 muestras de agua, analizando un total de 27 muestras de agua. Para el suelo, se tomaron 3 muestras de suelo por cada pozo de agua a diferentes profundidades (0 - 15 cm, 15 - 30 cm y 30 - 45 cm) con dos repeticiones cada una, siendo en total 54 muestras de suelo. En lo que corresponde a la vegetación se analizaron muestras de hojas, tallo y frutos de tres especies forrajeras: Vinorama (*Acacia peninsularis*), Mezquite (*Prosopis articulata*) y Palo Verde (*Cercidium floridium*), analizando en total 88 muestras.

De los pozos de agua analizados se obtuvo que todos excepto los pozos 8 y 9 de los poblados El Triunfo y El Comitán sobrepasaban el límite permitido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) 0.05 mg L^{-1} , siendo el valor más alto el del pozo 6 de San Antonio (0.24 mg L^{-1}) con un pH de 5.9.

Cabe hacer mención que además de la determinación de arsénico, se analizó el pH del agua por influir en la concentración de arsénico, observando la existencia de una relación proporcional entre la concentración de arsénico y su pH, obteniendo que entre más ácido sea el pH del agua (5.9 mínimo - 7-8 máximo), mayor es la concentración de arsénico V (arseniato). Concluyendo que el agua de los pozos de San Antonio incluyendo el pozo 7 de El Triunfo presentan concentraciones arriba del límite establecido.

Es importante mencionar que el comportamiento del arsénico en el agua subterránea no es estable, existiendo factores ambientales que influyen de manera determinante en la variación de arsénico: como el pH del agua, recarga del acuífero por la temporada de lluvias, lixiviación del arsénico por la precipitación, presencia de fallas geológicas, etc., como se ha mencionado en otros estudios. Por otro lado, se observó que la topografía del terreno influye en las concentraciones de arsénico presentes en el agua, encontrando concentraciones mayores en los pozos localizados en la partes bajas y por lo tanto una fracción biodisponible de arsénico mayor en el suelo del mismo poblado (SA). Lo que nos indica que existe una aportación importante de este elemento debido a la actividad minera de la zona.

De las 54 muestras de suelo analizadas se obtuvo que los poblados de SA-ET sobrepasan el límite establecido por la Organización Panamericana de Salud (2 mg kg^{-1}), siendo el pozo edafológico 3 el más alto con una media de su fracción biodisponible de 17.31 mg kg^{-1} , lo que nos corrobora la presencia de las altas concentraciones de arsénico existentes en el distrito minero, principalmente para el poblado de San Antonio a la profundidad de 15 - 30 cm con un valor (20.86 mg kg^{-1}), lo que nos indica la lixiviación la percolación, la topografía, la textura, la porosidad, la época del año (evaporación), la falta de materia orgánica en la superficie, la cercanía de desechos mineros en este caso de la planta Los San Juanes, pueden ser factores que influyen en las concentraciones de arsénico en el suelo. Concluyendo que la fracción biodisponible de arsénico en suelos de los

poblados de San Antonio y El Triunfo sobre pasa los límites establecidos por la organización panamericana de la salud, lo que nos indica que el aporte de arsénico de origen antropogénico es importante, al existir una relación entre la concentración de arsénico presente en agua y suelo, con la cercanía de los desechos, tipo de desecho y tiempo que tenga éste a la intemperie.

Los resultados para la vegetación nos indican que la media de la vegetación de El Triunfo (10.57 mg kg^{-1}), fue mayor a la de los otros poblados y la estructura vegetativa que obtuvo el valor más alto (12.60 mg kg^{-1}) fueron las hojas. En tanto que por especie *Cercidium floridium* (Palo Verde) fue la de mayor concentración (42.73 mg kg^{-1}), sobrepasando todos estos valores el límite permisible (0.01 y 5.0 mg kg^{-1}) (NAS 1977), siendo esta vegetación consumida por el ganado de la región y éste consumido por la gente.

1. INTRODUCCION

En condiciones normales, la mayoría de los metales potencialmente tóxicos, se encuentran fijados en forma geoquímica en la naturaleza, por lo tanto, no presentan un peligro para la biota. Sin embargo, diversas actividades humanas, como la agricultura, la industria y la minería, han hecho que dicha situación cambie radicalmente, ya que favorecen la acumulación de diversos compuestos derivados de estos elementos en los suelos, en grandes cantidades en formas solubles. Con lo anterior, se altera el equilibrio natural, causando la contaminación de acuíferos y en ocasiones introduciéndose dichos elementos en la red trófica (Larry *et al.* 1979). La bioacumulación de metales tóxicos puede llegar a ser tal, que puede alcanzar los más altos niveles tróficos donde se encuentran ubicados los denominados predadores topos, en el que se incluye al hombre, ocasionando con ello, que a corto o largo plazo existan trastornos y enfermedades por exposición gradual (Jiménez, 1994). Ejemplo de lo anterior, es el arsénico que por sus características propias y por la de sus compuestos, ha sido considerado como un metaloide carcinogénico y bioacumulativo (Cebrián *et al.* 1983).

A nivel mundial, la mayoría de los estudios realizados sobre arsénico son aquellos en los que se llega a afectar la salud humana (Knoth 1966; Cebrián *et al.* 1983; Pershagen *et al.* 1984; Aposhian 1989; Ishiníshi *et al.* 1989; Sabbioni *et al.* 1991; Díaz-Barriga 1996 y Wang y Rossman 1996). Algunos de los países que han realizado estudios sobre la relación entre la ingestión de arsénico en el agua que beben sus habitantes, respecto a la incidencia de cáncer han sido: Argentina (Zaldívar 1974; Bogorno *et al.* 1987), Bangladesh (Fazal *et al.* 2001), Estados Unidos (Larry *et al.* 1979; Philip E. 1987; Goldman y Dacre 1991) Finlandia (Piispanen 1991), India (Chakraborty y Saha 1987), México (Albores *et al.* 1979; Cebrián *et al.* 1983; Enríquez 1993 y Díaz-Barriga F, 1996) y Taiwan (Tseng *et al.* 1968 y Tseng 1977). Ejemplo de estudios hechos sobre la inhalación de arsénico presente en el suelo son: (Nriagu 1994; Huyck H. 1993; Smedley y Kinniburgh 2002) y en plantas y suelo:

(Sánchez y García 1993; Larry *et al.* 1979; Andrew *et al.* 1996; Kabata y Pendias 2002; Monroy *et al.* 2002 y Chaillou *et al.* 2003).

De la misma forma se han hecho estudios sobre el comportamiento del arsénico en agua y sedimentos: (Cebrián *et al.* 1983; Carrillo-Chávez y Drever 2000; Smedley y Kinniburgh 2002; Kabata y Pendias 2002 y Peters y Blum 2003).

En nuestro país, el arsénico se ha evaluado principalmente en el agua, siendo las regiones con más altos índices Achichipilco, Puebla, la colonia Angeles de Chihuahua y, actualmente la de mayor auge es la Comarca Lagunera (Coahuila-Durango), en donde se incluyen las ciudades de San Pedro, Francisco I. Madero, Tlahualito, Gómez Palacio, Matamoros y Zimapan Hidalgo. La lista anterior se presenta de acuerdo a su orden de afectación, presentando concentraciones desde 0.08 hasta 0.38 mg L⁻¹. El límite recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS 1990) y de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994 para el arsénico en el agua es de 0.05 mg L⁻¹ (Martínez 1997). Por otra parte, el contenido de arsénico en aguas depende de la zona en que se encuentre. Las más altas concentraciones se han encontrado en aguas subterráneas (0.08-22.0 mg L⁻¹) y en aguas próximas a minas con depósitos de sulfuros poli metálicos (0.01-300 mg L⁻¹) (Onishi 1969). Sin embargo, en la Comarca Lagunera la concentración de arsénico en el agua es de hasta 0.67 mg L⁻¹ (Bejar *et al.* 1988), poniendo en peligro la salud de sus habitantes. Altos niveles de este elemento causan sintomatología como hiperpigmentación, queratosis y cáncer en la piel (Cortés *et al.* 1998). En 1940, se empezaron a detectar problemas en esta región; para 1962 se tenían reportados 217 casos de personas que presentaban tales padecimientos (Galván y Corey 1987).

Para Albores *et al.*(1979), el origen del problema en la Comarca radica en la sobre-explotación de las aguas subterráneas, ya que esta región tiene como fuente principal de abastecimiento el agua de los pozos con profundidad mayor a 50 metros, donde la

explotación a través del tiempo ha ido cambiando las características del agua incrementándose la concentración de arsénico a niveles tóxicos.

En 1993, Enríquez realiza un estudio sobre el problema de arsénico en agua en la Región Lagunera, donde los objetivos fueron identificar la fuente principal de contaminación arsenical, determinar la variabilidad espacial del hidroarsenicismo en la región y analizar la situación de la acumulación del contaminante en el sistema suelo-planta-producto. En este caso se analizaron 96 pozos profundos, detectándose tres áreas de altas concentraciones de arsénico. La primera fue el área de San Pedro y Fco. I Madero, Coahuila y Tlahualillo, Durango; la segunda fue el área de Mapimí, Durango; La tercera fue Matamoros y Viesca, Coahuila. De este estudio se concluye que existen factores que afectan directamente la calidad del agua en la región, particularmente el aporte de arsénico. Dichos factores son la geología del subsuelo como factor natural y el drenaje de minas como factor humano de carácter puntual; en este caso la variación del hidroarsenicismo se debe al movimiento de agua subterránea como respuesta inmediata a los gradientes generados por las altas densidades de los pozos en operación en cada una de las áreas.

Recientemente en el estado de San Luis Potosí (Villa de la Paz-Matehuala) se realizó una evaluación de la contaminación por arsénico y metales pesados en suelo, sedimento y agua, por presentar esta localidad una explotación por poco más de 200 años de un yacimiento de sulfuros polimetálicos (plomo, zinc y cobre), lo que ha provocado que se haya depositado un gran volumen de residuos mineros tipo terreros, jales y escorias en los alrededores de este poblado, encontrando concentraciones de arsénico en el agua de $4,800 - 7,000 \text{ mg L}^{-1}$, en suelo $19 - 384 \text{ mg kg}^{-1}$ y en sedimento $20 - 28,600 \text{ mg kg}^{-1}$ (Monroy *et al.* 2002).

En el estado de Baja California Sur, el distrito minero de San Antonio y El Triunfo (SA-ET) se puede observar la presencia de arsénico en el ambiente debido a la actividad

minera a partir del año 1780 para el poblado de El Triunfo y del año 1820 para San Antonio, siendo en el año de 1880 la mayor actividad para San Antonio y declinando para 1910; en este distrito minero se extraía principalmente oro y plata. Como resultado de esta actividad son más de 800,000 toneladas de desechos mineros que se observan en la región y de los cuales en la actualidad se extrae oro de manera artesanal, de estos desechos Carrillo y Drever (1997) han estimado un contenido promedio de 4% de óxido de arsénico, de los cuales aproximadamente 600 toneladas son de arsenolita pura.

Martínez (1997) y Carrillo (1996) recopilan la información obtenida por Escandón (1983) y González (1995) y clasifican el material de desecho capaz de generar contaminación por arsénico al medio ambiente de la siguiente forma:

a) *Jales oxidados*. Es el material extraído de minas de vetas epitermales. Los depósitos consisten principalmente de pirita (FeS_2), arsenopirita (FeAsS), esfalerita (ZnS) y galena (CuFeS), que se encuentran asociados a oro y plata. Se consideran oxidados ya que la oxidación es necesaria para desprender el oro y la plata de las estructuras sulfurosas. Dichos materiales han sido registrados en los alrededores del poblado de San Antonio, caracterizados por presentar un color rojo-amarillento, con tamaño de grano similar al de limos y arcillas. La altura aproximada de los depósitos de este material oscila entre 1 y 11m. Cabe mencionar que para el poblado de El Triunfo se calculan 110,000 toneladas y para San Antonio se estiman unas 32,000 toneladas (González 1995).

b) *Terreros de baja ley*. Se ubican en las cercanías de las antiguas minas entre San Antonio y El Triunfo, en este caso, por lo general cada obra minera cuenta con su propio terrero (González 1995). El tamaño de los fragmentos de los materiales va de 30 cm hasta una talla similar al tamaño de la arena. Se calculan unas 500,000 toneladas de estos materiales acumulados en las pilas expuestas al intemperismo (Escandón 1983).

c) *Pilas de cianuración*. Es el material que la gente del lugar trabaja a manera de reciclaje como los jales oxidados y terreros en pequeñas pilas de cianuración, del cual llegan a extraer hasta 2 g de oro por tonelada. Los trabajos se realizan en los alrededores del poblado de San Antonio. La mayoría del cianuro en este proceso es reciclado, pero el peligro mayor para el ambiente es el material acumulado en las pilas de cianuración que se lixivia al subsuelo de donde posteriormente puede lixiviarse a los acuíferos (Martínez 1997).

d) *Antiguas plantas de proceso*. Dentro del área de estudio existen 2 plantas de proceso, Los San Juanes en San Antonio y El Triunfo en el mismo poblado. Dichas plantas contienen cámaras de combustión, que se empleaban para la quema de minerales con el fin de oxidar a los sulfuros; además de contar con cámaras de sublimación y chimeneas. Se estima que existen aproximadamente 600 toneladas de material con alto contenido de arsénico (arsenolita, As_2O_3) (Martínez 1997).

e) *Vetas de sulfuros metálicos*. Consisten en zonas de falla con reemplazamiento de sulfuros en diferentes profundidades. El intemperismo de los minerales sulfurosos de este tipo de vetas liberan cantidades considerables de arsénico y ácido sulfúrico al agua subterránea de la región de San Antonio-El Triunfo (drenaje ácido de minas) (Martínez 1997).

En 1996, el Consejo de Recursos Minerales realiza un estudio geoquímico ambiental en El Triunfo- San Antonio, en donde se enfoca principalmente a la contaminación del agua subterránea por arsénico, indicando que contiene un promedio de 0.04 mg L^{-1} .

Martínez (1997), considera que existen dos tipos de niveles de concentración de arsénico en el agua subterránea el geogénico que son los valores de fondo; esto es, los valores naturales debido a las vetas de sulfuros metálicos presentes en la región y el antropogénico debido a los desechos mineros que se encuentran a campo raso, como sub-producto de la

extracción de oro y resultado de aproximadamente 100 obras mineras. De acuerdo con Carrillo y Drever (1998) y Martínez (1997), este material ha estado aportando anualmente al menos 0.5 a 2.0 mg L⁻¹ de arsénico al sistema de agua subterránea de la región. Cabe hacer mención que Carrillo y Drever (1998) han observado que de manera natural el acuífero de esta región presenta una adsorción de arsénico y que se encuentra estrechamente ligada al pH del acuífero es decir, al aumentar la adsorción, el pH disminuye ocasionando la existencia de las llamadas "plumas de arsénico" e incluso han estimado que tardaría aproximadamente de 700 a 5,000 años en llegar al acuífero de La Paz, el cual surte de agua a la ciudad de La Paz, la ciudad más importante del estado de Baja California Sur.

La Comisión Nacional del Agua (CNA) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) han realizado estudios sobre la presencia de arsénico en el agua que consume el ganado en los poblados de la región, obteniendo resultados de análisis químicos en muestras de abrevaderos del ganado, encontrando concentraciones de arsénico por arriba de 0.30 mg L⁻¹ y como consecuencia de los datos observados, el pozo que abastecía agua a la población de San Antonio fue clausurado por recomendaciones de CNA al organismo operador del sistema de agua potable. Esta misma procuraduría realizó un estudio sobre la concentración total de arsénico en muestras de suelo de San Antonio obteniendo concentraciones arriba del 1.29 mg kg⁻¹ (PROFEPA 1993).

Por todo lo anterior se considera necesario plantear estudios que nos ayuden a recopilar toda la información generada con el fin de ampliar nuestros conocimientos sobre los efectos ambientales que esta causando el arsénico en la región, así como conocer los efectos que pueda causar al hombre al estar ingiriendo el arsénico de manera directa o indirecta, tanto a corto como a largo plazo. Con estos estudios, no sólo conoceremos el daño que se causa al ambiente, sino que además estaremos en capacidad de buscar posibles soluciones a la problemática que generan las diferentes actividades humanas en nuestra propia salud.

1.1 ASPECTOS GENERALES SOBRE EL ARSENICO.

El arsénico (As) es un elemento que se encuentra en forma natural en la corteza terrestre. El As como elemento puro es de color gris metálico, pero en esta forma es poco común encontrarlo en el medio ambiente. Las fuentes minerales en que se encuentra son la esmaltita (CoAs_2), cobaltita (CoAsS) y arsenopirita (FeAsS); los últimos dos minerales se presentan como impurezas de otros metales como el cobre, oro, estaño, plomo y zinc, de cuyas industrias mineras se obtiene como subproducto de su fundición. El As posee una alta reactividad en presencia de gas hidrógeno, convirtiéndose en arsina, un gas con propiedades sumamente tóxicas (Martínez 1997).

Los tipos de arsénico presentes en la naturaleza son el As III (H_3AsO_3 , arsenito), que es un arsénico que se combina con carbono e hidrógeno para formar compuestos orgánicos y se presenta principalmente en animales y plantas. El As V (H_3AsO_4 , arseniato) es un arsénico que se combina con oxígeno, cloro y sulfuro para formar compuestos inorgánicos y se presenta en agua y suelo. El arsénico elemental es el trióxido de arsénico (As_2O_3) es el subproducto de las operaciones en la fundición de un metal. En la explotación minera, la fundición de metales no ferrosos y la quema de combustibles fósiles son los procesos industriales principales que contribuyen a la contaminación arsénica de origen no natural del aire, agua y suelo. En el agua y los sedimentos, casi todo el arsénico está presente en el estado pentavalente (arseniato). Muchos compuestos arsénicos tienden a fijarse por adsorción en los suelos y la lixiviación da lugar a contaminación de acuíferos. La transformación redox entre el arsenito y el arseniato depende del pH y del potencial redox. La absorción del arsénico en partículas aerotransportadas inhaladas es altamente dependiente de la solubilidad y del tamaño de las mismas ([http://www. Librys.com/problemasdequimica/suelo.html](http://www.Librys.com/problemasdequimica/suelo.html) 2003).

Los compuestos de este metaloide han sido utilizados durante mucho tiempo como medicamentos y venenos. Su uso medicinal fue descrito por Hipócrates alrededor del año

400 a.c. A principios del siglo XX, los arsenicales orgánicos se emplearon para combatir enfermedades como la tripanosomiasis y la sífilis. También para el tratamiento de enfermedades cutáneas crónicas, anemia, leucemia y algunas otras de tipo pulmonar. Durante la primera Guerra Mundial se utilizó el gas "Lewisita" (clorovinilo de cloroarsina), un potente irritante local y tóxico a nivel sistémico (Cebrián y Albores, 1998). Además de su uso medicinal existen otros usos y aplicaciones del arsénico como en el industria de plaguicidas donde se usan los arsenatos y arsenitos como insecticidas, larvicidas y herbicidas. En la industria de la refinación al ser el arsénico metálico agente para la aleación de cobre y oro, así como su uso en la industria de las pinturas y textiles donde es usado como pigmentos, bronceadores, decolorantes y esmaltes, entre otros. (Martínez 1997).

1.1.1 Fuentes de Exposición.

La exposición del hombre a agentes de este tipo data desde hace siglos ya que se encuentra presente en diferente concentración en agua, suelo y aire; pudiendo producir diferentes estados patológicos con manifestaciones locales como son lesiones en la piel, leucemias, alteraciones renales y digestivas, así como diferentes tipos de cáncer (Albores *et al.* 1979).

Desde el punto de vista ambiental, el arsénico puede ser liberado por la actividad volcánica y la erosión de depósitos minerales subterráneos y superficiales. La explotación de dichos depósitos o yacimientos minerales está acompañada de un impacto permanente y negativo al medio ambiente, principalmente para el suelo y el agua. Los problemas ambientales resultantes de dicha actividad son:

- *Drenaje ácido de minas.* Es la formación y movimiento de agua con pH relativamente bajo debido a la oxidación de sulfuros metálicos.
- *Presencia de metales pesados en el suelo.* Problema que ha ocasionado que muchas minas tengan que cerrar por la contaminación que producen en suelos agrícolas.

- *Metales pesados en el agua superficial y subterránea.* La minería se considera como una actividad que ha provocado contaminación de las aguas superficiales, como en el caso de Montana (E.U) y China donde se registran ríos contaminados con metales pesados. En el caso de las aguas subterráneas, la contaminación se debe a la lixiviación de agua de precipitación, ríos, canales y masas de agua intra continentales superficiales que pueden penetrar a través de la porosidad de los agregados del suelo, mediante el proceso denominado infiltración (Unda 1994); caso similar es el del arsénico presente en el suelo a causa de la actividad minera donde este contamina el agua subterránea al ser lixiviado (Martínez, 1997).

Para Cebrián y Albores (1998), existen otras actividades humanas que pueden propiciar la contaminación con arsénico, entre los que destacan:

1. El uso de combustibles fósiles, como el carbón con alto contenido de arsénico en las plantas de energía eléctrica.
2. Los procesos de fundición y refinación de metales no ferrosos (plomo, zinc y cobre).
3. El uso de preservativos arsenicales para madera.
4. En la manufactura de semiconductores para la industria electrónica elaborados a base de arseniuros de galio e indio.
5. El almacenamiento inadecuado de desechos industriales que contienen arsénico. Cabe señalar que México es uno de los principales productores de este metaloide (cerca del 20 por ciento de la producción mundial).

1.1.2 Toxicidad.

La toxicidad del arsénico es compleja, ya que depende de la vía de exposición, de su

valencia y de la forma química. Las sales inorgánicas de As(III) (forma reducida) son más tóxicas que las sales de As (V) (forma oxidada) y que los compuestos orgánicos, siendo el As(V) el que se presenta en el agua. Los efectos característicos de la exposición aguda en el hombre son: alteraciones cardiovasculares, nerviosas, renales, gastrointestinales y hepáticas. En casos graves, hay caída de la presión arterial, estado de choque, pérdida de los movimientos voluntarios, confusión, psicosis, delirio, coma y muerte (Larry *et al.* 1979; EPA 1989; Bejar *et al.* 1988; Goldman y Dacre 1991; Nriagu 1994; Cebrián y Albores 1998).

La exposición crónica al arsénico en el agua de consumo humano causa lesiones cutáneas características, como alteraciones en la pigmentación, hiperqueratosis palmoplantar y papular y carcinoma epidermoide. Dichas lesiones son los signos clínicos en el hombre más evidentes de exposición crónica al arsénico. En el caso de los trabajadores expuestos por vía inhalatoria presentaron incrementos en la presencia de cáncer de pulmón, en tanto que la exposición oral a arsénico aumenta la presencia de cáncer en la piel, vejiga, riñón, hígado y pulmón. Aunque no parece alterar directamente el material genético, posiblemente inhibe algunas enzimas involucradas en su replicación y reparación, potenciando la acción de otros carcinógenos. También se ha demostrado que interfiere con la capacidad de defensa inmunológica de los individuos expuestos, aumentando su susceptibilidad a infecciones (Cebrián y Albores 1998).

1.1.3 Relación entre el pH y el tipo de arsénico presente en agua.

En el medio ambiente es posible encontrar distintos tipos de arsénico y estos se encuentran relacionados con su estado de oxidación (-3, 0, +3 y +5), siendo el As III y el As V las formas más frecuentes en aguas naturales. Las formas de arsénico orgánico son producidas principalmente por la actividad biológica, presentándose en aguas superficiales, siendo estas las formas más afectadas por la contaminación ambiental. El potencial redox y el pH son factores importantes en el control de las

especiación del As, encontrando que a pH de 3 a 7 solo se presenta AsIII (arsenito) disminuyendo conforme aumenta el pH hasta un rango de 11, en tanto que el AsV (arsenato) se encuentra presente a pH de 4 a 5, disminuyendo a pH de 5.5 (Fig. 1), en donde las condiciones redox tienden a cambiar indicando el estado de oxidación y el estado del arsénico en ambos casos (Smedley y Kinniburgh 2002).

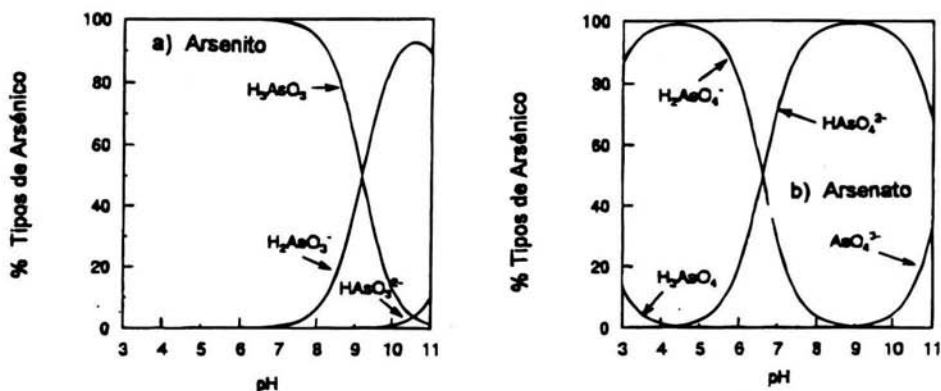


Figura. 1 Relación entre el pH y el tipo de arsénico presente en el agua

1.1.4 Indicadores de Exposición.

En el humano los valores típicos de arsénico urinario en individuos no expuestos son menores a 10 mg L^{-1} y el límite ambiental propuesto es de 100 mg L^{-1} . En la inmensa mayoría de los lugares contaminados estudiados en México, los valores encontrados en orina oscilan entre 500 y $4,000 \text{ mg L}^{-1}$. La cuantificación de arsénico en el cabello y uñas es un buen indicador de exposición crónica, mientras que los niveles en sangre son menos útiles, debido a la corta permanencia del arsénico en ella (Cebrián y Albores 1998).

En el caso de las plantas y el suelo, la toxicidad depende de la concentración disponible de arsénico en el suelo y se debe principalmente a condiciones inducidas por el hombre, debido a compuestos como el arsenato de sodio y el trióxido de arsénico que formaron

parte de herbicidas; al arsenato de calcio, arsenato de plomo y arsenato cupríco contenido en plaguicidas, mismos que fueron utilizados durante muchos años en la agricultura. En condiciones normales el arsénico es considerado como un elemento no esencial tanto para plantas como para animales (Larry *et al.* 1979).

1.1.5 Establecimiento de límites.

Los límites permisibles para el arsénico dependen de las concentraciones de arsénico que han sido verificadas en varias partes del mundo en las cuales no se han presentado o detectado efectos negativos sobre la salud de la población (Cuadro 1).

Cuadro 1. Contenidos normales y límites permisibles para las diferentes matrices ambientales.

Matriz	Normal	Límite permisible
Agua océanos	0.001 - 0.008 mg L ⁻¹ a)	
Agua ríos	0.001 - 0.005 mg L ⁻¹ a)	
Agua de bebida		0.05 mg L ⁻¹ b)
Agua de consumo humano		0.05 mg L ⁻¹ c)
Suelo	0.1 - 40 mg kg ⁻¹ d)	2 mg kg ⁻¹ a)
Vegetación	0.01 - 50 mg L ⁻¹ e)	2.6 mg L ⁻¹ f)**

Referencias: a) Galvan y Corey 1987; b) OMS 1990; c) NOM-127-SSA1-1994; d) Cebrián y Albores 1998 (Contenido total de As en suelos vírgenes); e) Nacional Academia de Ciencias de EUA 1977; f)** Servicios de Salud Pública de E.U.A para especies vegetales comestibles (Sánchez y García 1993).

En lo que respecta a los límites permisibles de arsénico presente en los vegetales se estima que las partes comestibles son las que generalmente acumulan los niveles más bajos de As y que las concentraciones altas se localizan en la raíz y los niveles intermedios en las estructuras reproductivas (Wagner *et al.* 1979). Por otro lado Larry *et al.* 1979 reporta que The National Research Council (1977) menciona en su literatura que la toxicidad por As depende de la concentración biodisponible en los suelos. El As y sus compuestos son solubles y su migración dentro del suelo está limitada por su adsorción por partículas

como la arcilla, hidróxidos y la materia orgánica (Kabata y Pendias 2002). Las concentraciones de arsénico en suelos vírgenes pueden variar de 0.1 a 40 mg L⁻¹ (Cebrián y Albores 1998).

1.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

El presente estudio se desarrolló en dos áreas: El distrito minero de SA-ET y El Comitán, el último se utilizó como testigo por estar situado dentro del área restringida del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), en el predio denominado El Comitán. (Fig. 2).

1.2.1 Ubicación.

San Antonio y El Triunfo se localizan en la parte meridional del estado de Baja California Sur, a 55 Km al sur de la Ciudad de La Paz y 86 Km al norte de Cabo San Lucas. El

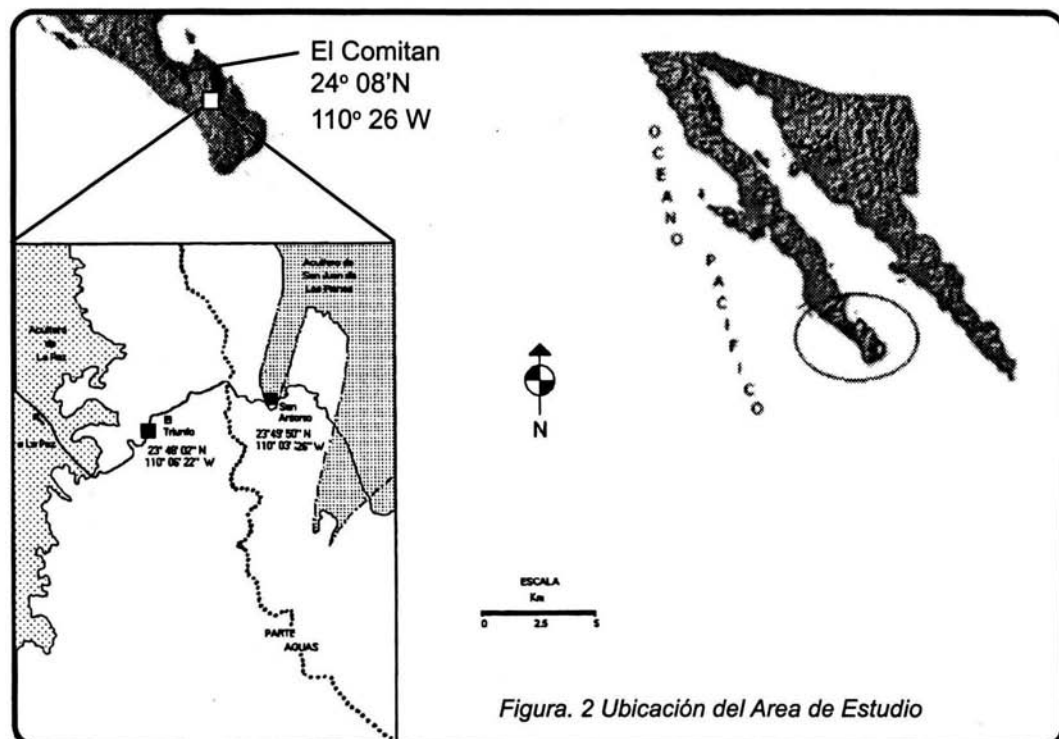


Figura. 2 Ubicación del Area de Estudio

poblado de El Triunfo se ubica en las coordenadas 23° 48' 02" N y 110° 06' 22" W a 341 msnm. Por su parte San Antonio se localiza en 23°49' 50" N y 110° 03' 26" W a 554 msnm.

El área restringida del CIBNOR ubicada en El Comitán se encuentra localizada en la porción meridional de la Península de Baja California, con coordenadas geográficas 24°08' N y 110°26' W, a 35 Km al norte de San Antonio y El Triunfo.

Algunas de las características de población y vivienda de San Antonio y El Triunfo son: Para el poblado de San Antonio se tienen censadas 137 viviendas habitadas en las cuales viven 712 personas de las cuales 218 son económicamente activas, para el poblado de El Triunfo existen 87 viviendas habitadas con un total de 218 personas de las cuales 126 se consideran económicamente activas (González 1995).

1.2.2 Clima.

De acuerdo con la fórmula climática de Köppen, modificada por García (1973) en el área se presenta un clima de tipo BS (h')hw(e), que es un clima árido, cálido, con régimen de lluvias de verano, con un porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2 mm, siendo extremoso. La precipitación del sitio de estudio, presenta dos picos, uno durante la época de verano, en donde alcanza su máximo valor mensual (septiembre) y otro en la época de invierno. El régimen de lluvias es de verano, esto es, que la precipitación recibida incide en dicha temporada y que el valor del mes más lluvioso (156.7 mm) es diez veces la del mes más seco (10 a 15 mm). Las lluvias de verano son provocadas por la influencia en la región de fenómenos meteorológicos de origen tropical, conocidos como "chubascos", que pueden convertirse en tormentas tropicales, ciclones o huracanes. Dichos fenómenos se originan en el océano Pacífico oriental y en su mayoría se desplazan con dirección noroeste. Las lluvias que se presentan durante el invierno son

conocidas como "equipatas", su magnitud es menor que las del verano y no son de carácter torrencial (Troyo-Diéguez *et al.* 1990).

La temperatura promedio anual del sitio es de 22.1°C, lo cual le confiere su característica cálida. De acuerdo con las temperaturas medias mensuales, el mes más frío es enero con 17.9 °C y el mes más caliente es julio con un promedio de 26.4°C

1.2.3. Geología.

Geológicamente, el área de SA-ET se encuentra ubicada en la parte central del bloque tectónico de Cabo San Lucas. (Fig. 3) Las unidades litológicas más antiguas corresponden

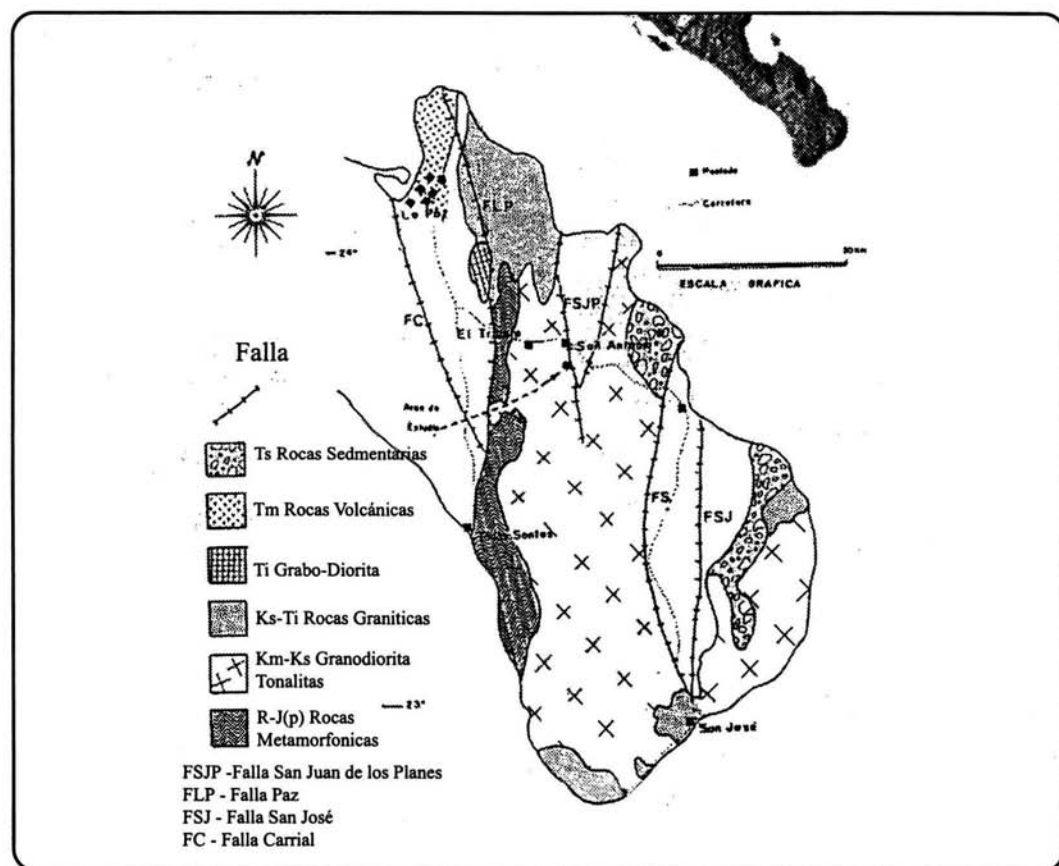


Figura 3. Geología del Bloque Cabo San Lucas (Modificado de Carrillo, 1990)

a un complejo de rocas metamórficas de diferente origen que desarrollan superficies bien definidas. Dichas superficies se presentan como esquistos de biotitas, de muscovitas y cuarzos-feldespáticos, calizas recristalizadas y gneisses. Tales rocas son consideradas como Paleozoicas (Carrillo 1996).

En lo que se refiere a los yacimientos minerales, los de mayor distribución son los de las fisuras asociadas a zonas de falla de carácter regional de rumbo noreste-suroeste, los cuales contienen mineralización de oro, plata, plomo, zinc, cobre y arsénico. Las estructuras mineralizadas alcanzan hasta 6 km de longitud con un espesor promedio de 0.09 m (veta La Reforma- La Testera). Es común la alta concentración de valores, principalmente oro y plata, en forma de bolsas, tanto a profundidad como a lo largo de las vetas, como es el caso de las minas San Andrés, San Isaías y La Reforma (Carrillo y Huyck 1997).

En el granito de la Sierra La Trinchera en su flanco oriente existen zonas con fuerte alteración potásica. En relación a los pórfidos auríferos que contienen depósitos de Stockwork, con materiales diseminados consisten principalmente de oro libre, asociado a piritita y arsenopiritita. Su distribución es más restringida, como sucede en las localidades de el Tajo, San Antonio y San Alberto. Las dimensiones conocidas de dichos cuerpos mineralizados son de hasta 8,000 m de longitud y 200 m de espesor (al oriente de San Antonio). Las alteraciones que afectan a este tipo de yacimientos son oxidación, silicificación y cloritización. Las rocas más comunes que los alojan son intrusivas cuarzodioríticas-tonalíticas (Martínez 1997).

Estructuralmente Martínez (1997) encontró que el área esta controlada en general por cinco direcciones de estructuras:

- a) Falla del Carrizal con rumbo N 10°-42°W con longitudes desde 400 m a 35 Km.

- b) Falla normal de La Paz con dirección norte-sur franco a N 5° E con longitud de 40 km .
- c) Falla San Juan de Los planes con rumbo N 24°– 39° E con longitudes de hasta 25 km.
- d) Falla Santiago con rumbo N45°- 65° E con longitudes de 40 km.
- e) Falla San José con dirección N 65° -80°W a E-W franco.

1.2.4 Topografía.

En el área de estudio se encuentran numerosas colinas y lomeríos, siendo moderadamente montañosa. La presencia de una cordillera en la zona muestra un desorden orográfico al norte y al sur, aunque diferente para una y otra micro-región, probablemente como una consecuencia de la historia e intensidad de diversos procesos tanto endógenos como exógenos. El relieve de la región bajo estudio empieza a caracterizarse por un agostamiento de la cordillera (poblados El Triunfo y San Antonio) y está formado en su parte central por una zona con topografía diversa y menos abrupta en su flanco este (Carrillo 1996). Por otro lado la fisiografía del área del Comitán es considerada una planicie costera aluvial formada en el Pleistoceno por el acarreo y deposición de fragmentos principalmente de rocas graníticas, provenientes de la actividad erosiva de la Sierra de La Laguna, ubicada a unos 50 km al Sur de la Ciudad de La Paz en Baja California Sur (Arriaga y Cancino 1992).

1.2.5 Suelo.

Los tipos de suelo de la región de SA-ET y El Comitán, según la clasificación utilizada por el INEGI, basada en la clasificación FAO/UNESCO 1968 modificada por DETENAL (1979), son los Litosoles, Regosoles, Yermosoles y Fluvisoles (Fig. 4)

Descripción y composición de las unidades de suelo:

a) Litosol. Se caracterizan por tener una profundidad menor de 10 cm, hasta observarse roca, tepetate o caliche duro. Sus características son muy variables y están en función del

material que los forma. Pueden ser fértiles o infértiles, arenosos ó arcillosos. Su susceptibilidad a erosionarse depende de la zona en donde se encuentren, de la topografía y del mismo suelo y puede ser desde moderada hasta muy alta (DETENAL 1979).

b) Regosoles eútricos. Están formados por materiales transportados intemperizados aún no consolidados. Son suelos poco desarrollados, formados directa ó indirectamente de rocas graníticas, razón por la cual son de textura gruesa, siendo fácilmente erosionables. Se caracterizan por no presentar capas distintas, son claros generalmente y se parecen bastante a la roca que tienen debajo cuando no son profundos; se pueden presentar asociados a diversos tipos de vegetación. Poseen una capa de roca que limita la profundidad del suelo a menos de 50 cm, ó entre 50 cm y 1 m; son de fertilidad moderada o ligeramente alta y no presentan fases químicas que limiten el desarrollo de cultivos. Su uso agrícola está principalmente condicionado a su profundidad y a que no sean pedregosos (DETENAL 1979).

c) Yermosol lúvico. Se caracteriza por tener un subsuelo con acumulación de arcilla. Son rojizos o pardos claros. En numerosas ocasiones acumulan más agua que los Xerosoles. Su vegetación es generalmente de pastizal. Su utilización agrícola está restringida definitivamente a las zonas en donde se pueda contar con agua de riego (DETENAL 1979).

d) Fluvisol eútrico. Se caracteriza por estar formado por materiales acarreados por agua. Están constituidos por materiales disgregados que no presentan estructura en terrones, es decir, son suelos muy poco desarrollados. Pueden ser someros o profundos, arenosos o arcillosos, en función del tipo de materiales que lo forma (DETENAL 1979)

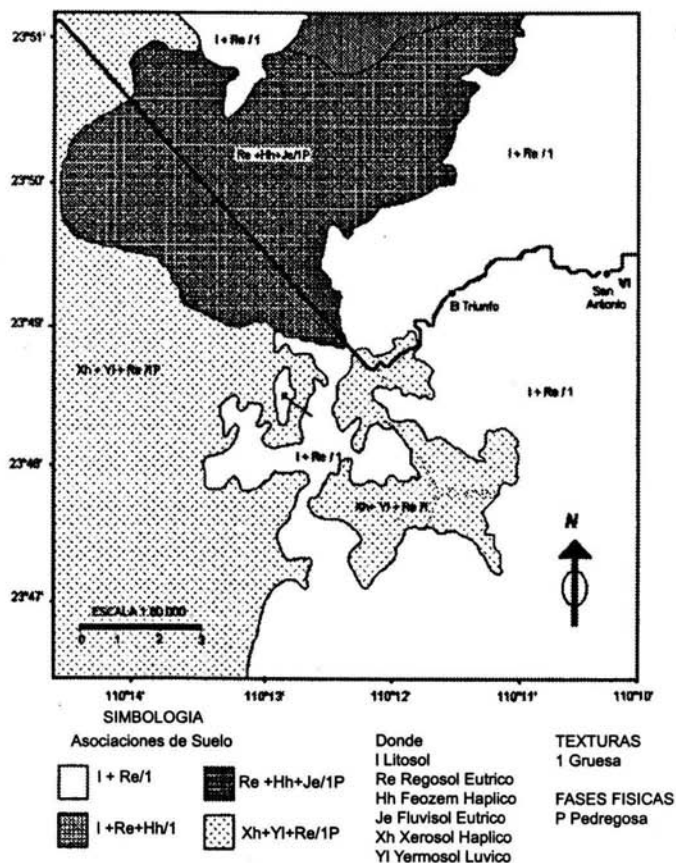


Figura 4. Mapa de la distribución de los suelos dentro del área de estudio

1.2.6 Vegetación.

Los sitios de estudios (SA-ET y El Comitán) se encuentran comprendidos dentro del área biogeográfica de la Región del Cabo de Baja California Sur. La vegetación de esta región presenta características áridas y subtropicales; la primera es debida a la influencia del Desierto Sonorense, mismo que se presenta en casi el 80% de la superficie de la Península de Baja California. La segunda es debida a la selva baja caducifolia, misma que caracteriza los cañones y cañadas en las estribaciones de la Sierra de La Laguna, presentando los tipos de vegetación denominados selva baja caducifolia y matorral sarcocaule.

La vegetación más representativa del matorral sarcocaulé, se caracteriza por la presencia de especies de tallo grueso y voluble, y con corteza papirácea; son arbustos que portan hojas micrófilas y plantas anuales, que crecen sólo en la temporada de lluvia. Las especies estructuralmente más importantes son *Acacia peninsularis* (Vinorama), *Jatropha cinerea* (lomboy), *J. cuneata* (matacora), *Pachycereus pringlei* (cardón), *Bursera microphylla* (torote), *Cyrtocarpa edulis* (ciruelo), *Prosopis articulata* (mezquite) y *Fouquieria diguetii* (palo adán) (Arriaga y Cancino 1992).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General:

Cuantificar el arsénico presente en el agua subterránea, la fracción biodisponible de este elemento en el suelo y las concentraciones de arsénico en tres especies de plantas que consume el ganado en la región del Cabo en Baja California Sur, México.

2.2 Objetivos Particulares:

1.- Cuantificar si el arsénico presente en los pozos de agua que abastecen a las localidades de San Antonio y El Triunfo sobrepasa los límites establecidos por la Norma Oficial Mexicana y la Organización Mundial de la Salud.

2.- Comparar las propiedades físicas y químicas de los suelos perturbados por la actividad minera que rodean a los pozos de agua de los poblados de San Antonio-El Triunfo, con los suelos no perturbados del área restringida del CIBNOR (El Comitán).

3.- Determinación de la fracción biodisponible de arsénico presente en las muestras de suelo de los poblados de San Antonio y El Triunfo, para su posterior comparación con las muestras de El Comitán, con el fin de conocer la cantidad de arsénico biodisponible presente en el suelo en la región del Cabo.

4.- Cuantificar el arsénico presente en tallo, hojas y frutos de 3 especies de plantas que consume el ganado vacuno en la región del Cabo y El Comitán.

5.- Determinar que especie forrajera y que estructura vegetal presenta mayores concentraciones de arsénico.

6.- Comparar de los resultados obtenidos para el suelo y plantas con los límites permisibles establecidos por la Organización Panamericana de Salud, la Secretaría de Salud Pública de EUA y la Nacional Academía de Ciencias de los EUA.

3. MATERIALES Y METODOS

Para la elaboración de este trabajo la metodología se dividió en las siguientes etapas:

3.1 *Revisión de literatura y sitios de internet.* En esta etapa se recopiló la información bibliográfica existente de trabajos previos del área en estudio, así como la consulta de información en diferentes sitios del internet, como son: <http://crac3.ch.kcl.ac.uk/mirrors/scitech/asdw/asdwabs1.htm#01> (Arsenic- Exposure and Health 1997).

<http://www.epa.gov/enviro/html/emci/chemref/7440382.html>(Arsenic.Inorganic CAS#7440-38-2 1998)

(<http://www.vitrokele.com/soil/soil-chemistry.htm>1998). <http://inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc018.htm>(Arsenic2003). <http://bvs.sld.cu/revistas/hie/vol37-3-99/hie05399.htm> (Fracciones disponibles de arsénico, plomo, cadmio y mercurio en sedimentos de corrientes superficiales seleccionadas 2003).

<http://www-librys.com/problemasdequimica/suelo.html>2003.(Contaminantes químicos en el suelo).

<http://www.dchtrust.org/arsenic%20king%20of%20poison.htm> (Arsenic: King of Poinson 2004).

3.2 *Análisis de fotografías aéreas.* Se fotointerpretaron las fotografías aéreas 3, 4 y 5 de la línea 67, escala 1:75 000, del vuelo realizado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) 1994, para los poblados de SA-ET, con la ayuda de un estereoscopio Abrams Modelo SV-1. La fotointerpretación se realizó con el fin de ubicar los desechos mineros cercanos a los poblados de SA-ET.

3.3 *Recorridos de campo.* Se realizaron 4 salidas al campo durante los meses de junio,

julio y agosto de 1997, con el fin de reconocer el área. Se consultaron previamente los trabajos realizados por la PROFEPA (1994) y Carrillo (1996), en donde ubican las minas, los desechos mineros y los pozos de agua que abastecen de agua potable a los poblados de San Antonio y El Triunfo. Cabe mencionar que para este estudio se consideraron los pozos de agua potable que surten de agua a las mencionadas poblaciones y que se encuentran a menos de 50 m de algún tipo de desecho minero. Además se analizaron 3 especies vegetales que consumiera el ganado en la época del año muestreada (verano), siendo ellas: vinorama (*Acacia peninsularis*), mezquite (*Prosopis articulata*) y palo verde (*Cercidium floridum*).

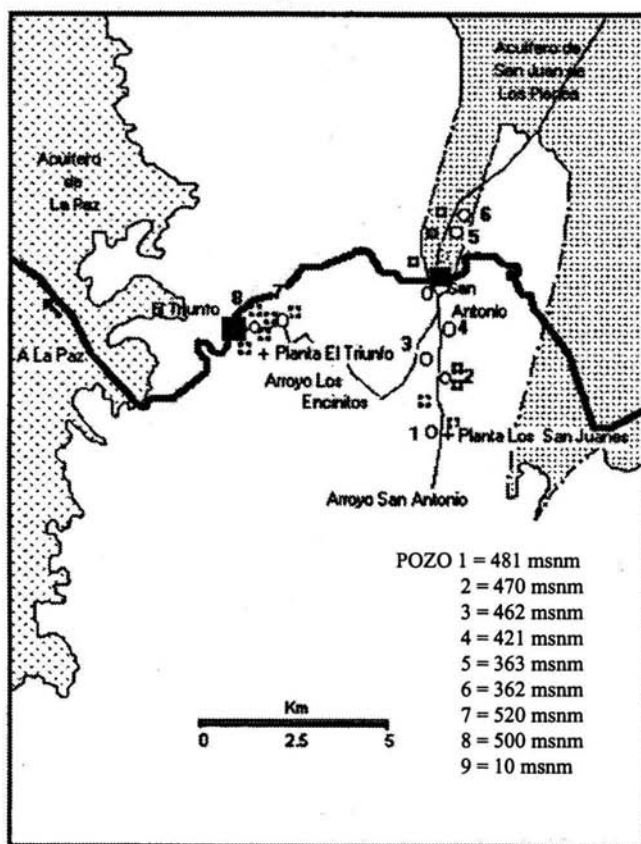


Figura 5. Localización de los desechos mineros [], Plantas de procesamiento minero +, pozos O de agua en San Antonio - El Triunfo

Una vez determinados los pozos, los desechos a estudiar y las especies vegetales se prosiguió a su georeferenciación con ayuda de un GPS Modelo Pro Mark X. Como características particulares del área en estudio se puede mencionar que los pozos de agua de San Antonio y El Triunfo se encuentran cercanos a los arroyos temporales "San Antonio" y "Los Encinitos" cuya pendiente varía de 12% y 8 % respectivamente (INEGI 1985).

En lo que respecta a la zona considerada como testigo, se buscó un área con una distribución vegetal semejante al área en estudio, que presentara un pozo de agua potable y que fuera una zona con perturbación humana mínima, eligiendo el área restringida del CIBNOR dentro de El Comitán.

La ubicación y distribución de los pozos y desechos mineros en estudio se puede observar en la Figura 5.

3.4 *Trabajo de campo.* Esta etapa se dividió en 3 partes, para lo cual se realizaron 3 salidas para la colecta de muestras (13, 17 y 28 de Mayo de 1998 respectivamente).

a) *Colecta de muestras de agua.*

Para la toma de muestras de agua se utilizó ácido nítrico (HNO_3) 4 M para descontaminar todo el equipo, el cual se sumergió en el mismo por un período de 24 h. Para la obtención de las muestras se empleó una botella vandor y un cordel de plástico. Las muestras se colocaron en frascos de polietileno enjuagados con agua destilada y desionizada (Van Loon, 1985). Antes de colocar la muestra en el frasco, se enjuagó el frasco con agua de la misma muestra. Se prosiguió a su llenado tratando de llenarlo por completo para evitar gasificación que pueda alterar la composición química (Martínez, 1997). Posteriormente se llevaron las muestras al laboratorio.

Cuadro 2. Distribución de las muestras de Agua.

Localidad / # Pozos de agua analizados	Replicas	Subtotal
San Antonio 6	3	18
Triunfo 2	3	6
El Comitán 1	3	3
Total		27 Muestras

Los parámetros que se analizaron *in situ* fueron los siguientes:

- *pH y Temperatura.* Por lectura directa con Potenciómetro Modelo Beckman 21 pH Meter digital.
- *Conductividad Eléctrica (C.E.).* Por lectura directa del conductímetro modelo PM-70 CB.

b) Colecta de muestras de suelo.

Se realizaron 4 pozos edafológicos conforme a los 4 puntos cardinales alrededor de cada pozo de agua potable a estudiar, cuidando que estuvieran a distancias similares del pozo de agua y que no sobrepasaran un radio mayor a 50 m. Se utilizó el método de muestras compuestas, donde de cada uno de los pozos edafológicos tenía una profundidad de 45 cm, tomando muestras cada 15 cm (0-15, 15-30 y 30-45 cm) pesando aproximadamente 250 g cada una. Las cuatro muestras de la misma profundidad se mezclaron y homogenizaron quedando solo una muestra de 250 g para cada una de las profundidades, obteniéndose en total 3 muestras de suelo por cada pozo de agua potable, ésto con el fin de determinar a que profundidad se acumula el arsénico en el suelo (Contin 1984).

Para la toma de muestras se utilizó, cinta métrica, navaja, una pala y bolsas de 1k de plástico para evitar cualquier tipo de contaminación.

Una vez colectadas y etiquetadas las bolsas con muestras de suelo se procedió a llevarlas al laboratorio.

Cuadro 3. Distribución de las muestras de Suelo.

Localidad / # Pozos edafológicos analizados	Profund. del Pozo edafológico*	Réplicas	Subtotal
San Antonio 6	3	2	36
Triunfo 2	3	2	12
El Comitán 1	3	2	6
Total			54 Muestras

*Son 3 estratos para cada pozo (0-15, 15-30 y 30-45 cm de profundidad).

c) Identificación y colecta de la vegetación.

La identificación de las plantas en estudio (vinorama, mezquite y palo verde) fue realizada en el campo hasta nivel de especie por el Ing. Reymundo Domínguez Cadena, botánico del Programa de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.

Una vez identificadas las plantas seleccionadas, se muestreó como mínimo un individuo por cada especie vegetal que se encontrara distribuida dentro del diámetro de 50 m alrededor de cada pozo de agua y lo más cercana a los pozos edafológicos (2 a 8 m); una vez seleccionadas las plantas se procedió a la toma de muestras de tallo, hoja y fruto. La toma de cada una de las estructuras vegetales fue a la altura donde se observara el ramoneo del ganado vacuno (aprox. 1.5 m del suelo). Se recolectaron 4 ramas con orientación de acuerdo con los 4 puntos cardinales y que presentaran hojas adultas y frutos en lo posible. Las ramas fueron etiquetadas y transportadas inmediatamente al laboratorio en bolsas de papel, en donde se seleccionaron las primeras hojas adultas partiendo del extremo apical, las cuales fueron sacudidas con un pincel y separadas con ayuda de pinzas, para su posterior análisis. Por otro lado, los tallos y frutos fueron cortados en pequeños trozos para facilitar la digestión. Cabe mencionar que no todas las ramas presentaron frutos y que el número utilizado de los mismos no importó ya que se tomó el peso a analizar para cada

estructura (aprox. 1g) Para el área de El Comitán solo se encontraron mezquites dentro de un diámetro de 50 m. Por lo anterior no se analizaron otras especies en esta zona (vinorama y palo verde).

Cuadro 4. Distribución de las muestras de Vegetación.

SAN ANTONIO			
	Número de Plantas Analizadas		
Especie / Estructura	Tallo	Hoja	Fruto
Mezquite	9	9	4
Vinorama	7	7	6
Palo Verde	7	5	6
Sub-Total	23	21	16
EL TRIUNFO			
	Número de Plantas Analizadas		
Especie / Estructura	Tallo	Hoja	Fruto
Mezquite	3	3	1
Vinorama	3	3	3
Palo Verde	1	1	1
Sub-Total	7	7	5
EL COMITAN			
	Número de Plantas Analizadas		
Especie / Estructura	Tallo	Hoja	Fruto
Mezquite	3	3	3
Vinorama	0	0	0
Palo Verde	0	0	0
Sub-Total	3	3	3
Total			88 Muestras

3.5 Trabajo de laboratorio.

El material de cristalería utilizado en laboratorio fue previamente descontaminado con ácido nítrico 4M por un período de 24 h. Posteriormente fue lavado con agua desionizada y se permitió escurrir durante un día. Lo anterior fue efectuado antes de su uso para impedir algún tipo de contaminación o lectura errónea.

3.5.1 Agua.

En el laboratorio se filtraron las muestras por medio de una bomba Fast Vac Modelo Dv. 85N 1/2 HP motor y 2 stage, y filtros glass microfiber filters GF/F 0.047 mm marca Whatman, previamente descontaminados; por medio de lo anterior se evitó la presencia de materia orgánica que pueda contener arsénico y alterar el resultado de las muestras. Posteriormente se fijaron las muestras con 5 ml de HNO_3 a $\text{pH} = 2$ y se almacenaron a menos 4°C hasta su análisis, cuidando que el período de conservación de las mismas no fuera mayor a 6 meses. Posteriormente se descongelaron las muestras de agua a temperatura ambiente, ya descongelada la muestra se batió para su homogenización y toma de una alícuota de 25 ml, para continuar con la metodología general para la determinación de arsénico (Van Loon 1985). El rango de detección de este método para el agua fue de 0 a 2.5 mg L^{-1} de arsénico, con un porcentaje de recuperación del 80 al 85 %.

3.5.2 Suelo.

Las muestras de suelo debidamente referenciadas fueron extendidas sobre papel y secadas al aire por un período de 72 h. Posteriormente, se tamizaron en una malla de plástico de 2 mm de abertura para las determinaciones físicas (color, por ciento de saturación, porosidad y textura) y de 0.85 mm de abertura para las determinaciones químicas (pH , Conductividad y fracción biodisponible de As), utilizando para las dos primeras la metodología estándar (Hernández *et al.* 1991). Los métodos utilizados para cada una de las propiedades fueron los siguientes:

- Propiedades Físicas:

Se determinaron solo aquellas que ayudaran a clasificar el tipo de desecho minero cercano a los sitios de muestreo, de acuerdo con la clasificación dada por Carrillo, 1996.

- Color. Por el método comparativo con las tablas de color Munsell (Munsell 1975).
- Porcentaje de Saturación. Por el método de humedad ó diferencia de pesos (Hernández et al. 1991).
- Porosidad. Se determinó por el método de porosidad del suelo (Hernández et al. 1991).

$$\text{Porcentaje de Porosidad} = \frac{(1 - \text{Densidad aparente}^*) 100}{\text{Densidad de solidos}}$$

- Densidad aparente (*). Se determinó por el método de campo (Hernández et al. 1991).
- *Textura*. Se empleó el método del hidrómetro (Bouyoucos 1951), a través del cual se determinan los porcentajes de las partículas del suelo (arena, arcilla y limo). Para la determinación de la clase textural del suelo, se utilizó el triángulo de texturas elaborado por el personal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Hernández et al. 1991).

- Propiedades Químicas:

- *pH y Temperatura*. Por lectura directa del Potenciómetro Beckman Modelo 21 pH Meter digital (Jackson 1982).
- *Conductividad Eléctrica (C.E.)*. Por lectura directa del conductímetro Modelo PM-70 CB (Jackson 1982). El pH, C.E. y temperatura del suelo se midieron directamente del extracto de saturación.

• *Fracción Biodisponible del Arsénico presente en las muestras de suelo.* Para las muestras de suelo de los sitios de estudio (SA-ET y El Comitán), no se determinó el arsénico total, sino la fracción biodisponible del elemento al utilizar un ácido débil (ácido acético al 25 %) (Agemian y Chau 1976). Este método se corroboró en el laboratorio al poner directamente 10 muestras del suelo en estudio y una muestra del estandar del sedimento BCSS-1 de la National Research Council of Canada y agregarles la mezcla ácida 3:1 de ácido clorhídrico y ácido sulfúrico cuidando que los gases desprendidos fueran absorbidos por la campana de extracción, una vez que las muestras se enfriaron se les agregó 1 ml de hidroxilamina al 2% y se sometieron a la metodología para la determinación de arsénico, obteniendo concentraciones de arsénico mayores que las registradas para sus extractos.

Metodología:

- Se pesan 5.0 g de suelo seco, se ponen en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, se le agregan 25 ml de ácido acético al 25 %, se deja reposar durante 24 h tapando la boca del matraz con plástico (Kleen Pack).
- Después de las 24 h, se puso la muestra en la bomba Fast Vac. Modelo Dv 85N de 1/2 HP motor, de donde se obtuvo el extracto del suelo al filtrar la muestra por filtros microfibre filtros GF/F de 0.047 mm marca Whatman.
- Se vació el extracto a un nuevo matraz y se le agregó una mezcla ácida 3:1 de ácido clorhídrico y ácido sulfúrico, cuidando que los gases desprendidos fueran absorbidos por la campana de extracción, una vez que la muestra se enfrió se le agregó 1 ml de hidroxilamina al 2 %.
- Esta solución se vació en el matraz del generador de hidruros (Buck Scientific) del espectrofotómetro de absorción atómica y se continuó con la metodología para la determinación de arsénico.

El rango de detección de este método para suelo es de 0 a 25 mg L⁻¹ de arsénico, con un porcentaje de recuperación del 80 al 85 %.

3.5.3 Plantas.

En laboratorio se separaron, etiquetaron y guardaron en bolsas de papel estraza cada una de las partes vegetales, las cuales fueron deshidratadas en un horno a 70°C por un período de 24 horas. Posteriormente, se aplicó la metodología de metales presentes en tejidos descrito por la IAEA (1985).

Metodología:

- Se pesa 1.0 g de tejido seco (hojas, tallos o frutos).
- La muestra se coloca en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, se le adiciona 10 ml de ácido nítrico y 1 ml de ácido sulfúrico concentrado dentro de una campana de extracción. Dentro de la misma campana se pone una parrilla eléctrica para calentar el matraz a 70°C, cuidando que la muestra no hierva y evitando los gases, para lo cual se utiliza equipo de seguridad como máscara, guantes y lentes.
- Una vez que se observe que no hay desprendimiento de gases color ámbar (ácido nítrico) y que los tejidos han sido digeridos, se debe tener especial cuidado que la muestra no se seque.
- Una vez digerida la muestra y enfriada a temperatura ambiente se aforó la muestra con agua desionizada a un volumen de 50 ml, para posteriormente continuar con la metodología para la determinación de arsénico.

En el caso de las plantas se determinó el arsénico contenido en cada una de las estructuras vegetativas (hojas, tallos, frutos), el rango de detección de este método es de 0 a 4 mg L⁻¹ de arsénico, con un porcentaje de recuperación del 80 al 85 %.

4. METODOLOGIA GENERAL PARA LA DETERMINACION DE ARSENICO.

Entre las técnicas existentes para la determinación de arsénico en el presente trabajo se utilizaron las siguientes:

- Procedimiento de arsina-azul de molibdeno, utilizado para determinar el arsénico total en materiales de plantas y soluciones (Chapman y Parket 1991).
- Proceso de estandarización de hidruros para arsénico y selenio (Buck Scientific Inc. 1992).

Para la determinación de la fracción biodisponible de arsénico:

- *Fracción Biodisponible del Arsénico presente en las muestras de suelo.* Por el método descrito por Agemian y Chau (1976).

Para la obtención de la técnica para el arsénico en agua, suelo y plantas en este trabajo, fue necesario la integración de las siguientes técnicas, la de Chapman y Parket (1991) para la elaboración de reactivos y captación de la arsina, y la de Buck Scientific Inc.(1992) para el procedimiento. Para la determinación de la fracción biodisponible de arsénico en suelos se utilizó el método de Agemian y Chau (1976) y para la vegetación la metodología de metales presentes en tejidos descrito por la IAEA (1984). La anterior modificación fue hecha por Naranjo-Pulido y Acosta Vargas (1998). Cabe mencionar que esta técnica cuantifica el arsénico presente en sus dos formas (As III y As V). La técnica modificada fue evaluada en laboratorio obteniendo un porcentaje de recuperación del 80 al 85 % para agua, suelo y vegetación y para su validación se utilizó el estándar BCSS-1 certificado por el National Research Council of Canada. Para la determinación del límite de detección de este método se utilizó el estándar de arsénico de 1000 ppm (1ppm=1mg L⁻¹) marca Spectrum .

- Fundamento:

La determinación de la concentración de Arsénico se realizó mediante la obtención de Arsina (AsH_3) que es reducida en un medio acuoso por la solución de borohidruro de sodio, o bien la arsina a arsénico pentavalente (As V) con yodo, formando un complejo de azul heteropolimérico de molibdeno y arsénico con molibdato de amonio y sulfato de hidracida (Chapman y Parket 1991).

En el caso de análisis de muestras de agua no es necesario la digestión de las muestras ya que no existe la presencia de materia orgánica, debido a la previa filtración de la muestra.

- Reactivos:

- 1) *Solución estándar de 1000 ppm (1ppm=1mg/l =1mg/kg) marca Spectrum de arsénico.*
- 2) *Solución normal de yodo, 0.02N.* Disuélvase 2.54 g de yodo y 8 g de yoduro de potasio en 25 ml de agua destilada. Cuando la solución este completa dilúyase a un litro en un matraz volumétrico. Se almacenó en una botella oscura.
- 3) *Soluciones de trabajo de yodo, 0.002N y 0.001 N.* Se diluyó 10 ml y 5 ml de solución normal a 100 ml, en un matraz volumétrico, con agua destilada. Las soluciones se preparaban nuevas cada día.
- 4) *Molibdato de amonio.* 1% en ácido sulfúrico 5N. Añadir 70 ml de ácido sulfúrico concentrado a aproximadamente 300 ml de agua destilada. Se disolvió 5 g de $(\text{NH}_4)_6\text{MO}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ en la mezcla ácida caliente. Cuando la solución esté completa, se enfrió y diluyó a 500 ml en un matraz volumétrico, con agua destilada.
- 5) *Sulfato de hidracina,* 0.15 %. Se disolvió 0.3 g de $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ en unos 150 ml de agua destilada y luego se diluyó a 200 ml.
- 6) *Yoduro de Potasio.* Se preparó una solución al 15% con agua destilada. Prepárese inmediatamente antes de su empleo.

7) *Solución ácida*, 3:1 HCl/H₂SO₄.- (Chapman D. y Paret. 1991).

- Procedimiento:

Para su análisis las muestras fueron tratadas previamente conforme a la metodología descrita para agua, suelo y plantas, tomando la cantidad de 25 ml de muestra para el agua, 5 g de suelo y 1g de tejido seco para la vegetación. Cabe mencionar que el suelo fue sometido con anterioridad al método de extracción para obtener la fracción biodisponible de arsénico utilizando un ácido débil (ácido acético) al 25 % (método descrito por Agemian y Chau,1976) y que en el caso de la vegetación se la aplico con anterioridad metodología de metales presentes en tejidos descrita por la IAEA (1984), posteriormente se continuó con la técnica general para la determinación de arsénico.

Se agregó la mezcla ácida 3:1 de HCl y H₂SO₄, posteriormente se le adicionó 1 ml de Hidroxilamina al 2% y se colocó la solución en el generador de hidruros (Buck Scientific Inc. 1992) del espectrofotómetro de absorción atómica modelo 200 A) (Fig. 6). Ya en el generador de hidruros se le inyectaron 5ml de Borohidruro de Sodio al 5%, teniendo cuidado que el tiempo de goteo de la inyección fuera el mismo para cada una de las muestras (Buck Scientific Inc. 1992).

Por otro lado, en un tubo de ensayo limpio se recibió la arsina en una solución de 5 ml de yodo al 0.01 N. Este tubo de ensayo fue colocado en un recipiente con hielo molido, esto con el fin de evitar alguna pérdida de arsina. Con el fin de tener una mayor circulación de la arsina en el generador se inyectó un gas inerte (argón), posteriormente y una vez dejando de inyectar Borohidruro se hizo un arrastre con argón por un período de 10 minutos conservando el flujo en el sistema. Una vez transcurrido el tiempo, se le adicionó al tubo de ensayo con la solución de yodo y arsina, 0.5 ml de molibdato de amonio y 0.2 ml de sulfato de hidracida al 0.15 %.

Posteriormente se sometió a un baño en agua en ebullición durante 10 minutos,

observándose un color azul, cuya intensidad aumentaba proporcionalmente a la concentración de arsénico en la muestra. Una vez obtenida la coloración, se dejó enfriar el tubo y se tomó una alícuota de la muestra para medir su lectura en el espectrofotómetro (Spectronic Génesis 2) a una longitud de onda de 830 nm con ayuda de una celda de 5 ml (Chapman y Parket 1991).

El resultado obtenido del espectrofotómetro se utilizó para cuantificar la concentración de arsénico mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Concen. de As en agua, suelo o plantas (mg L}^{-1}\text{)} = \frac{(\text{abs} - a)}{b} (\text{aforo}) \text{ entre (ml ó g de muestra)}$$

Donde:

abs = Lectura de la absorbancia con el espectrofotómetro.

a = Pendiente*

b = Origen *

aforo = 5.7 ml (suma de ml de yodo + hidracina + molibdato)

ml ó gr = (25 ml para el agua, 5 g para el suelo y 1 g para plantas).

Se realizó asimismo una curva de calibración donde se graficó la absorbancia contra la concentración para calcular la concentración de las muestras analizadas. Se encontró una curva de regresión lineal donde la pendiente para el agua, suelo y plantas varía (*a y *b) (Cuadro 5) linealmente.

Cuadro 5. Valores calculados para la pendiente (a) y el origen (b) del agua, suelo y plantas.

	Agua	Suelo*	Plantas*
a	0.0878	0.06396	0.06396
b	0.0964	0.08864	0.08864

* Los valores obtenidos para suelo y plantas fueron similares por presentar resultados similares de absorbancia.

AGUA



mezcla ácido
3:1 HCL H₂SO₄

1 ml
de hidroxilamina
al 2%

ENFRIAR

SE PONE EN
EL GENERADOR DE
HIDRUROS

ARGON

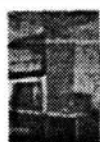
inyección
5 ml de borohidruro de sodio

10 MINUTOS EN EL SISTEMA

SUELO



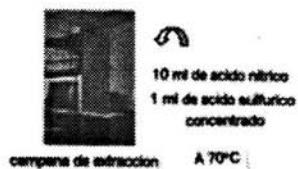
EXTRACCIÓN EN BOMBA



1 ml de hidroxilamina al 2%

ENFRIAR

VEGETACIÓN



ENFRIAR

AFORO A
50 ml AGUA DESIONIZADA



Baño MARIA
10 minutos

.3 ml de molibdato de amonio
0.2 ml de sulfato de hidrácido al
0.15 %

ENFRIAR

COLORACIÓN AZUL



espectrofotometro
850 nm

FORMULA CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO

Figura. 6 Metodología para la determinación de arsénico

5. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.

Para el análisis estadístico de los resultados se elaboró una prueba de análisis de varianza (ANOVA) (Sokal y Rohlf, 1969) de un factor, en donde al encontrar diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las variables en estudio, se realizó una prueba LSD (Least Significant Difference) para grupos homogéneos (Statistica, 1995).

Las variables a estudiar para cada factor fueron las siguientes:

5.1 Agua:

- 5.1.1. Correlación entre el pH de los pozos de agua y la concentración de arsénico.
- 5.1.2. Diferencias entre concentración de arsénico por pozo.
- 5.1.3. Diferencias entre concentración de arsénico por poblado.

5.2 Suelo:

- 5.2.1. Diferencias entre la fracción biodisponible de arsénico por perfil.
- 5.2.2. Diferencias entre la fracción biodisponible de arsénico por poblado.
- 5.2.3. Diferencias entre la fracción biodisponible de arsénico por profundidad.

5.3 Vegetación:

- 5.3.1. Diferencias entre la concentración de arsénico por poblado.
- 5.3.2. Diferencias entre la concentración de arsénico por estructura vegetativa.
- 5.3.3. Diferencias entre la concentración de arsénico por especie.

6. RESULTADOS

Para este estudio se analizaron un total de 169 muestras, de las cuales 27 son del agua, 54 del suelo y 88 muestras de vegetación (Cuadros 2, 3 y 4).

6.1 Agua.

6.1.1 Correlación entre el pH de los pozos de agua con la concentración de arsénico.

En el Cuadro 6 se registraron las medias para el pH de cada uno de los pozos analizados, esto se hizo con el fin de observar una relación entre el pH del agua y la concentración de arsénico, obteniendo que las muestras que registraron un pH más ácido (5.9) son aquellas que corresponden al pozo 6 y a la mayor concentración de arsénico. Sin embargo, para corroborarlo estadísticamente se aplicó un análisis de correlación (Sokal y Rohlf 1969), encontrando que existe una correlación negativa estadísticamente entre el pH y la concentración de arsénico ($r_s = -0.8355$; $r^2 = .6860$; $F_{(1,25)} = 57.8250$ $p < 0.0001$).

6.1.2. Diferencias entre concentración de arsénico por pozo.

Los resultados obtenidos en el laboratorio indican cantidades considerables de arsénico en los 6 pozos de agua analizados para el poblado de San Antonio. Todos ellos sobrepasando el límite establecido por la Organización Mundial de Salud (0.05 mg L^{-1}). Siendo el valor más alto el del pozo 6 con una media de la concentración de arsénico de 0.24 mg L^{-1} , y el más bajo el pozo 1 con una media de 0.08 mg L^{-1} (Cuadro 7). Cabe hacer mención que fue posible observar en los resultados obtenidos para los pozos de agua de este poblado, una tendencia a presentar mayor cantidad de arsénico en los pozos ubicados en las partes bajas del arroyo San Antonio (Cuadro 6).

En los pozos de agua analizados para el poblado de El Triunfo, el valor más alto se presentó en el pozo 7, con una media de la concentración de arsénico de 0.09 mg L^{-1} .

Opuesto a esto, el segundo pozo (8) analizado en este poblado el cual mostró un valor de la media de arsénico menor (0.04 mg L^{-1}) al límite permisible de la OMS (0.05 mg L^{-1}).

En el pozo que se utilizó como testigo (Pozo 9) no se detectaron concentraciones de arsénico con esta técnica, siendo el valor de su media de arsénico de -0.006 mg L^{-1} , lo que nos indica que para la zona de El Comitán no existe ningún aporte de arsénico de tipo antropogénico o geogénico.

A los resultados obtenidos con respecto a las diferencias entre las concentraciones de arsénico por pozo, se le aplicaron los análisis estadísticos mencionados en la metodología obteniendo ($F_{(8,18)} = 98.06$; $P < 0.0001$), que existen diferencias significativas entre los pozos en estudio.

La prueba estadística (LSD) para grupos homogéneos da como resultado 5 grupos, siendo el de valor mínimo el correspondiente al pozo 9 del poblado de El Comitán conformando el grupo "a", con valores más altos encontramos el grupo de valor intermedio mínimo grupo "b" conformado por el pozo 8 correspondiente al poblado de El Triunfo, con valores intermedios le sigue el grupo "c" formado por los pozos 1 y 2 de el poblado de San Antonio y el 7 del poblado de El Triunfo. Los valores del grupo "c" al "e" son valores que están por encima del valor que establece la norma como límite (0.5 mg L^{-1}) (Cuadro 7). El grupo "d" de valores intermedios altos, conformado por los pozos 5, 4 y 3 de San Antonio. Por último el grupo "e" cuyo valor es el más alto correspondiendo al pozo 6 del poblado de San Antonio (Fig. 8).

6.1.3 Diferencias entre la concentración de arsénico por poblado.

En general, los promedios (Cuadro 8) de los valores encontrados entre los poblados nos indican que para San Antonio existe una cantidad mayor de arsénico que El Triunfo y El Comitán en el cual no se registró presencia de arsénico.

Realizando el análisis entre las medias de concentración de arsénico por poblados, encontramos que existen diferencias entre las muestras del poblado de San Antonio (0.15 mg L^{-1}) con el Triunfo (0.06 mg L^{-1}) y a su vez con la media de El Comitán donde la concentración de arsénico no fue detectable (Cuadro 6).

A los resultados obtenidos con respecto a las diferencias entre la concentración de arsénico por poblado, se les aplicaron los análisis estadísticos mencionados en la metodología, obteniendo ($F_{(2,24)} = 17,51$; $P < 0.0001$), encontrando diferencias significativas entre poblados (Fig. 9).

El análisis estadístico (LSD) de grupos homogéneos da como resultado 5 grupos, nos muestra que ciertamente existen estas diferencias significativas entre poblados encontrando que el promedio de San Antonio tiene el valor de arsénico significativamente más alto que todos los demás conformando el grupo "c", mientras que El Triunfo presenta un valor más reducido (grupo "b"), siendo significativamente diferente a San Antonio. Pero que comparado con el promedio de El Comitán (grupo "a"), éste es estadísticamente diferente al igual que para el poblado de San Antonio, siendo los valores de los poblados de San Antonio y El Triunfo más altos del límite establecido por la norma (0.05 mg L^{-1}) (Cuadro 8).

Cuadro 6. Ubicación de los pozos de agua y medias de los análisis químicos del agua

No. de Muestras	Localidad y Tipo de material de desecho mas cercano.	Pozo	Ubicación	Profundidad del pozo* (m)	pH*	C.E* (ds/m)	As (mg L ⁻¹)
SAN ANTONIO							
1 a la 3	Planta Los Sanjuanes. A 5m de Antigua planta de proceso	1	23° 47' 47 N 110° 03' 20 w 481 msnm	1.5	6.2	0.25	0.08
4 a la 6	1 Km al Norte de la Planta Los San Juanes . A 15 m de Terreros de baja ley	2	23° 47' 14 N 110° 03' 20 w 470 msnm	2.20	6.3	0.35	0.09
7 a la 9	1.9 Km al Norte de Planta Los San Juanes.	3	23° 47' 11 N 110° 03' 27w 462 msnm	3.5	6.1	0.38	0.19
10 a la 12	1.95 Km al Norte de Planta Los San Juanes.	4	23° 47' 11 N 110° 03' 20w 421 msnm	.70	6.2	0.40	0.17
13 a la 15	2.85 Km al Norte de Planta Los San Juanes. A 10 m de Jales Oxidados	5	23° 48' 50 N 110° 03' 10w 383 msnm	2.50	6.1	0.29	0.16
16 a la 18 Promedio San Antonio	2.95 Km al Norte de Planta Los San Juanes . Sobre Jales oxidados	6	23° 48' 51 N 110° 03' 10w 362 msnm	1	5.9	0.30	0.24 X = 0.15
EL TRIUNFO							
19 a la 21	900m al S.E de Planta El Triunfo. Antigua Planta de Procesamiento	7	23° 48' 02 N 110° 06' 22 w 520 msnm	1.20	7.2	0.25	0.09
22 a la 24 Promedio El Triunfo	850 m al S.E de Planta El Triunfo Terreros de baja ley	8	23° 48' 03 N 110° 06' 22w 500 msnm	1.10	7.3	0.25	0.04 X = 0.06
EL COMITAN							
25 a la 27 Promedio El Comitán	Área restringida El Comitán.	9	24° 08' 10 N 110° 26' 30 W 10 msnm	2.10	7.8	0.25	** X= 0.00

Donde: C.E = Conductividad Eléctrica

pH* y C.E* antes de adicionar HNO₃ para fijar y conservar las muestras de agua para su posterior análisis.

*= Profundidad tomada en el fondo del pozo.

**= Concentración de arsénico por debajo del límite de detección de la técnica.

Cuadro 7. Análisis de Grupos Homogéneos (LSD) para las medias de concentración de arsénico por pozos de agua.

Poblado	Pozo	Media*
El Comitán	9	-.00 a
El Triunfo	8	.04 b
San Antonio	1	.08 c
San Antonio	2	.09 c
El Triunfo	7	.09 c
San Antonio	5	.16 d
San Antonio	4	.17 d
San Antonio	3	.19 d
San Antonio	6	.24 e

*Medias con letra distinta se consideran estadísticamente diferentes ($P < 0.05$)

Cuadro 8. Análisis de Grupos Homogéneos (LSD) para las medias de la concentración de arsénico por poblado.

Poblado	Media*
El Comitán	-.00 a
El Triunfo	.06 b
San Antonio	.151 c

*Medias con letra distinta se consideran estadísticamente diferentes ($P < 0.05$)

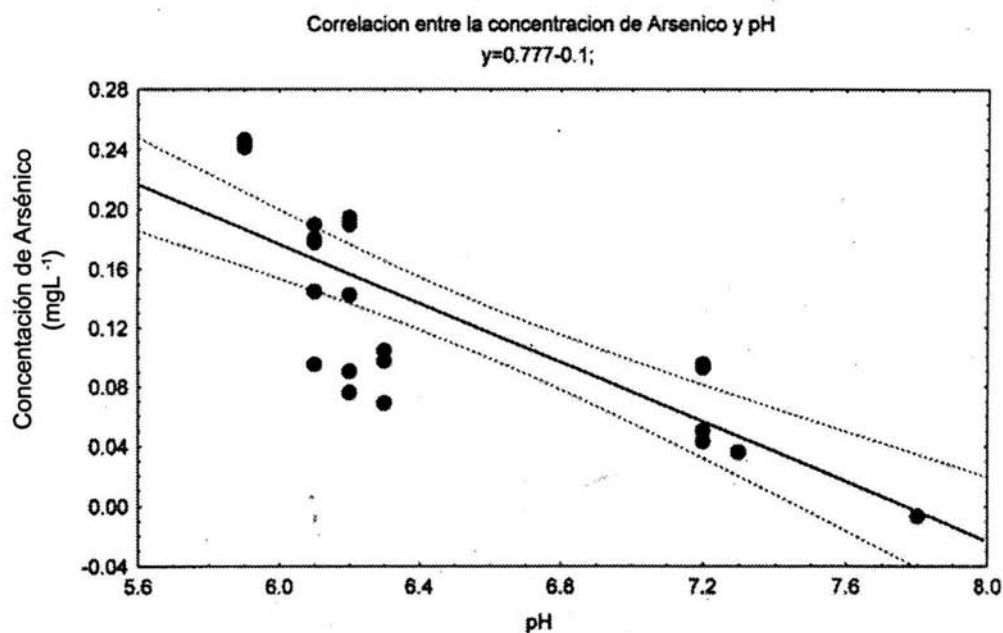


Figura. 7 Correlación del pH de los pozos de agua y la concentración de arsénico

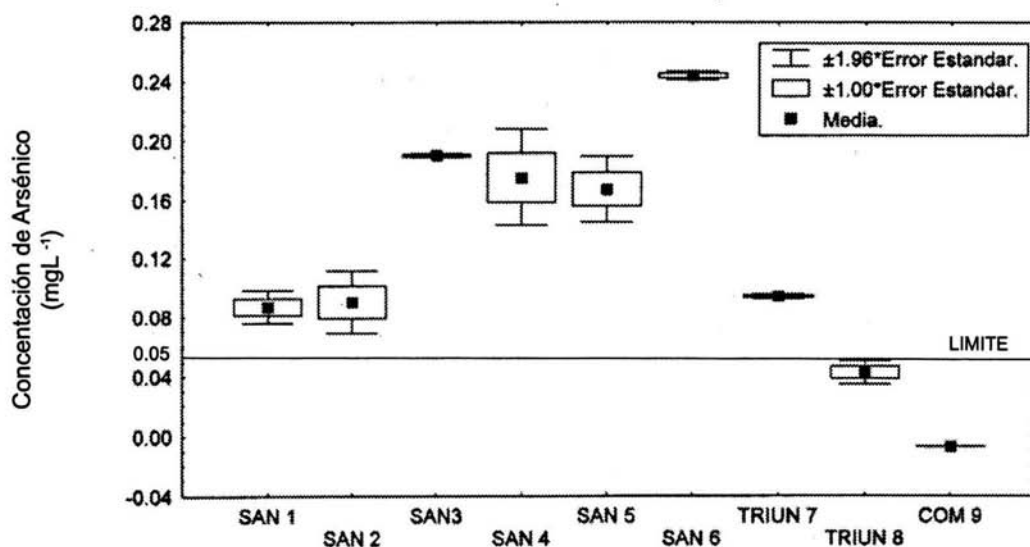


Figura. 8 Promedio de la concentración de arsénico por pozo (Donde la n para cada pozo es igual a 3)

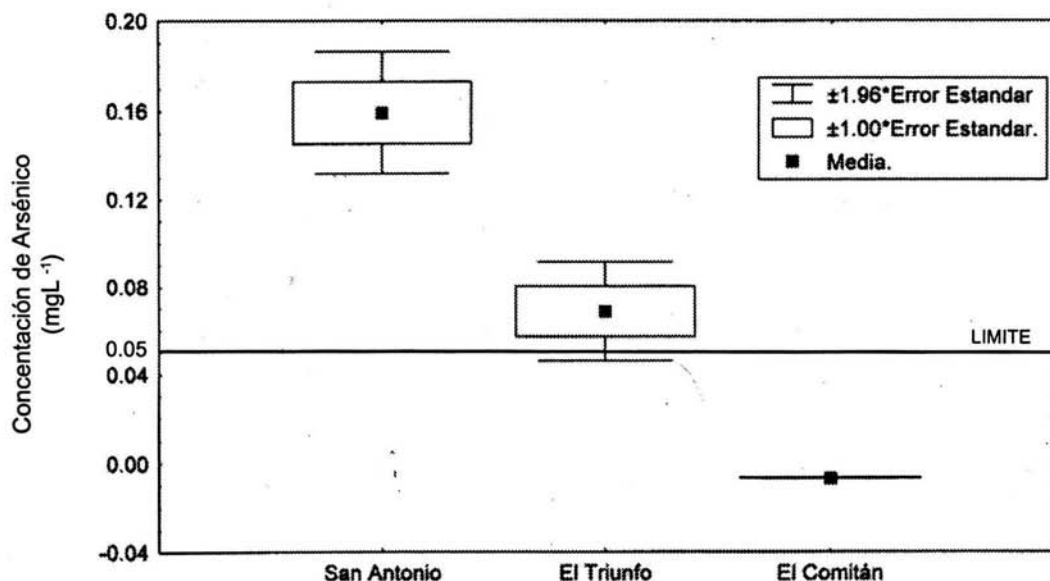


Figura. 9 Promedio de la concentración de arsénico por poblado (San Antonio n=18, El Triunfo n=6, El Comitán n=3)

6.2 Suelo.

6.2.1 Propiedades físicas de los suelos.

Los resultados obtenidos en el laboratorio de las propiedades físicas del suelo se muestran en el Cuadro 9.

a) Color.

Se observó que no existen cambios en el color de pozos edafológicos elaborados para los poblados de San Antonio y El Triunfo, es decir, que no existe una capa acumulativa en la superficie de materia orgánica, como la que se observó en el pozo 9, del poblado El Comitán (pardo en seco a pardo grisáceo oscuro en húmedo). Esta estratificación del color fue observable en la superficie del estrato de 0 a 15 cm de profundidad, aunque dicha estratificación del color desapareció al humedecer la muestra, conservando en húmedo un color homogéneo. Esta estratificación o cambio de color se le atribuye a que el

suelo del pozo edafológico 9 no ha sido removido o presenta perturbaciones diferencia de algunos de los suelos donde se realizaron los 8 pozos edafológicos restantes, cuyo material pudo haber sido removido o depositado por las actividades mineras, lo cual impide la existencia de estratificación del color, presentando coloraciones homogéneas en las diferentes profundidades.

b) Porcentaje de saturación.

El suelo perteneciente al poblado de El triunfo presentó la máxima capacidad de retención de agua con un valor del 39 %, en el pozo edafológico 8, en tanto que el pozo 1 del poblado de San Antonio presentó el valor mínimo (25%).

c) Porosidad.

En lo tocante al porcentaje de porosidad que presentaron los poblados, el del valor máximo se presentó para el poblado de San Antonio en el pozo 4 (45 %) y como valor mínimo los poblados de El Triunfo y El Comitán, en los pozos edafológicos 5 y 9 respectivamente (31%).

d) Densidad aparente.

El suelo que presentó una mayor masa de sólidos por un cierto volumen del suelo, volumen que incluye el espacio ocupado por los vacíos o poros del suelo y material sólido fue el pozo 4 del poblado de San Antonio (0.96 g.cm^3), en tanto que el valor mínimo fue para los pozos 5 de San Antonio y 9 del poblado de El Comitán (0.66 g. cm^3)

e) Textura.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el laboratorio, existen 3 clases texturales en los suelos analizados, siendo estas arena migajoso (Am), arena (A), migajón arenosa (Ma). Siendo arena migajoso y la migajón arenosa las clases predominantes para el

poblado de San Antonio, mientras que la arena migajoso lo fue para El Triunfo y arenosa para El Comitán.

Es necesario mencionar que el pozo 4 del poblado de San Antonio presentó valores máximos en las propiedades físicas como la porosidad, porcentaje de arena y densidad aparente, concordando por lo descrito por Buckman y Brady (1982) quienes mencionan que suelos cuyo contenido presenta alto porcentaje de arena, presentarán un alto porcentaje de espacios vacíos o poros y por lo tanto una densidad aparente alta. Otras características físicas que relacionan es el porcentaje de saturación con el porcentaje de arcillas, estableciendo que los suelos que contienen alto porcentaje de arcillas presentarán un porcentaje de saturación mayor, esto debido a la propiedad de retención de agua de estas partículas del suelo, encontrando que el pozo 8 del poblado del El Triunfo registro estas características.

Cuadro 9. Resultados de las propiedades físicas del suelo.

Pozo Edaf.	# Mues	Prof. (cm)	Color Seco	Color Húm.	% de Satur.	Poros. (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Text.	D.A. (g/cm ³)
1	1 y 2	a	10 YR4.5/3	10YR3/2	26	37	79	14	7	Am	.78
	3 y 4	b	10 YR4.5/3	10YR3/2	25	36	81	10	9	Am	.76
	5 y 6	c	10 YR4.5/3	10YR3/2	26	37	81	11	8	Am	.78
2	7 y 8	a	10 YR4.5/3	10YR3/2	36.6	38	84	11	5	Am	.81
	9 y 10	b	10 YR4.5/3	10YR3/2	36.6	42	87	10	3	A	.89
	11 y 12	c	10 YR4.5/3	10YR3/2	36.6	36	84	9	7	Am	.76
3	13 y 14	a	10 YR 5/4	10YR4/4	35	33	83	9	8	Am	.70
	15 y 16	b	10 YR 5/4	10YR4/4	34	37	85	5	15	Ma	.78
	17 y 18	c	10 YR 5/4	10YR4/4	36	35	83	7	10	Am	.74
4	19 y 20	a	10 YR4.5/3	10YR3/2	27.6	44	88	3	9	A	.93
	21 y 22	b	10 YR4.5/3	10YR3/2	27.6	42	87	5	8	A	.89
	23 y 24	c	10 YR4.5/3	10YR3/2	27.6	45	87	7	6	A	.96
5	25 y 26	a	10 YR4.5/3	10YR3/2	34	31	83	8	9	Ma	.66
	27 y 28	b	10 YR4.5/3	10YR3/2	34	32	84	8	8	Ma	.68
	29 y 30	c	10 YR4.5/3	10YR3/2	34	32	83	9	8	Ma	.68
6	31 y 32	a	10 YR 5/4	10YR4/4	36.3	42	82	7	11	Ma	.89
	33 y 34	b	10 YR 5/4	10YR4/4	36.3	41	82	7	11	Ma	.87
	35 y 36	c	10 YR 5/4	10YR4/4	36.3	42	83	8	9	Ma	.89
7	37 y 38	a	5 YR5/4	5YR3/3	36	37	79	11	10	Am	.78
	39 y 40	b	5 YR5/4	5YR3/3	36	36	79	12	9	Am	.76
	41 y 42	c	5 YR5/4	5YR3/3	36	36	79	11	10	Am	.76
8	43 y 44	a	5 YR5/4	5YR3/3	39	33	80	8	12	Am	.70
	45 y 46	b	5 YR5/4	5YR3/3	39	35	79	10	11	Am	.74
	47 y 48	c	5 YR5/4	5YR3/3	39	35	80	8	12	Am	.74
9	49 y 50	a	10YR5/3	10YR4/2	35	31	84	10	6	Am	.66
	51 y 52	b	10YR 5/3	10YR4/2	35	34	84	6	7	A	.72
	53 y 54	c	10YR5/3	10YR4/2	35	41	84	6	7	A	.87

DONDE: a=0-15 cm, b=15-30 cm y c=30-45cm. 10YR4.5/3 Pardo, 10YR3/2 Pardo oscuro, 10YR5/4 Pardo amarillento, 10YR4/4 Pardo amarillento oscuro, 5YR5/4 Rojo amarillento, 5YR3/3 Pardo rojizo oscuro, 10YR5/3 Pardo, 10YR4/2 Pardo grisáceo oscuro. Am Arena migajoso, A Arena, MA Migajon arenoso y D.A. Densidad Aparente

6.2.2. Propiedades Químicas de los suelos.

a) pH.

El valor máximo que se obtuvo de esta propiedad fue de 7.93 en el pozo 5 (estrato 30 - 45 cm) del poblado de San Antonio y el mínimo para este poblado fue de 6.90 en el pozo 3 (estrato 0 - 15 cm). En lo que se refiere al poblado de El Triunfo su valor máximo se registró en el pozo 8 (en sus tres estratos) y por último el valor máximo registrado para El Comitán fue de 7.16 del pozo 9 (estratos 0 - 15 y 15 - 30 cm) y la mínima de 7.14 (estrato 30 - 45 cm) para el mismo pozo edafológico (Cuadro 10).

b) Conductividad Eléctrica.

El valor máximo registrado de esta propiedad para el poblado de San Antonio fue de 3.36 dS/m del pozo edafológico 4 (estrato 15 - 30 cm) y como mínimo el pozo 1 y 6 con 2.03 dS /m (estrato 0 - 15 cm para los dos pozos). En el Triunfo el valor máximo fue de 1.61 dD/m del pozo 8 (estrato 30 - 45 cm) y como mínimo 1.41 dS /m del pozo 7 (estratos 0 - 15 y 30 - 45 cm). En lo que respecta al poblado de El Comitán su valor máximo fue de 2.2 del pozo 9 (estratos 0 - 15 cm y 15 - 30 cm) y como mínimo 2 dS /m del mismo pozo pero en su último estrato (estrato 30 - 45 cm). Teniendo un rango de conductividad en general para los tres poblados de 3.36 a 1.41 dS /m (Cuadro 10).

c) Fracción Biodisponible de Arsénico.

- Diferencias entre las fracciones biodisponibles de arsénico por pozo edafológico.

Los resultados obtenidos en el laboratorio (Cuadro 11), nos indican que existen cantidades considerables de arsénico disponible en los 6 pozos edafológicos de San Antonio. Ya que todos ellos sobrepasaron el límite ambiental establecido por la Organización Panamericana de Salud (Galvan y Corey 1987) (2 mg kg^{-1}). Obteniendo como valor más alto el pozo 6 con una media de 17.31 mg kg^{-1} , y el más bajo de 6.02 mg kg^{-1} .

De los pozos edafológicos analizados para El Triunfo, el de mayor valor fue el pozo 8 con una media de su fracción biodisponible de arsénico de 9.03 mg kg^{-1} y una media mínima en el pozo 7 de 8.34 mg kg^{-1} sobrepasando el límite ambiental antes mencionado para suelos. El pozo edafológico 9 fue el testigo y presentó una media de la fracción biodisponible de arsénico de 0.46 mg kg^{-1} , siendo este valor menor al límite ambiental establecido por la Organización Panamericana de Salud (Cuadro 1). A los resultados obtenidos con respecto a las diferencias existentes entre las fracciones biodisponibles de arsénico por pozo edafológico, se les aplicaron los análisis estadísticos antes mencionados en la metodología, obteniendo ($F_{(8,45)} = 21.16$; $P < 0.0001$), diferencias significativas entre los pozos edafológicos en estudio (Fig 10).

El análisis de grupos homogéneos (LSD), nos mostró que efectivamente si existen diferencias significativas entre los pozos edafológicos, encontrando 4 grandes grupos con valores similares (Cuadro 12). Siendo el pozo 9 del poblado de El Comitán el del valor más bajo (grupo "a") cuyo valor no rebasa el límite ambiental permitido (Cuadro 1). Los pozos edafológicos 6,2,5 del poblado de San Antonio y 7 y 8 del poblado El Triunfo obtuvieron los valores intermedios bajos (grupo "b"), en tanto que el pozo 4 de San Antonio obtuvo el valor intermedio alto (grupo "c"). El pozo 1 de este mismo poblado presentó un valor estadístico similar con el pozo 3 formado parte del grupo "c" y el grupo "d" quien tiene el valor estadístico más alto, en el cual podemos localizar pozo 3 del poblado de San Antonio (grupo "d").

- Diferencias entre la fracción biodisponible de arsénico por poblado.

De manera general, los promedios (Cuadro 10) de los valores registrados en el laboratorio, nos indican que para San Antonio existe una cantidad mayor que para El Triunfo y El Comitán.

Al analizar las medias de la fracción biodisponible de arsénico por poblado, encontramos

que existen diferencias entre las muestras del poblado de San Antonio (12.46 mg kg^{-1}) y El Triunfo (8.68 mg kg^{-1}) y una diferencia más marcada con el poblado de El Comitán (0.46 mg kg^{-1}) (Cuadro 13), cuyo valor no sobrepasa el límite ambiental para suelo (2 mg kg^{-1}). A los resultados obtenidos por poblados se les aplicaron los análisis estadísticos mencionados en la metodología, obteniendo ($F_{(2,51)} = 15,21$; $P < 0.0001$), encontrando diferencias significativas entre poblados (Fig. 11).

Al elaborar el análisis de grupos homogéneos (LSD), encontramos que existen 3 grupos conformados de la siguiente manera: el poblado de El Comitán con el valor más bajo (grupo "a") no rebasa el límite ambiental permisible (Cuadro 1) siguiéndole en orden creciente el poblado de El Triunfo con un valor intermedio (grupo "b") y por último el poblado de San Antonio con el valor más alto (grupo "c") (Cuadro 13). Cabe mencionar que los dos últimos poblados (SA-ET) sobrepasan el límite ambiental permisible.

- Diferencias entre la fracción biodisponible de arsénico por profundidad o estratos.

En el caso de las diferencias existentes entre los valores de la fracción biodisponible de arsénico por profundidad o estratos (Cuadro 10), se obtuvo que el valor mayor lo presentó el estrato 15 - 30 del pozo 3 del poblado de San Antonio (20.86 mg kg^{-1}). De manera contraria el mínimo se registró en el estrato 15 - 30 del pozo 9 de la zona testigo "El Comitán" (0.49 mg kg^{-1}). Por otro lado, la media mayor registrada fue para el poblado de San Antonio con un valor de 12.46 mg kg^{-1} , siguiéndole de forma decreciente El Triunfo. Por último el área restringida de El Comitán con 0.46 mg kg^{-1} . Todos estos resultados sobrepasando el límite permisible excepto el área de El Comitán. A los resultados obtenidos con respecto a la fracción biodisponible de arsénico por estratos, se le aplicaron los análisis estadísticos antes mencionados (ver metodología) obteniendo ($F_{(2,51)} = 0.26$; $P < 0.7695$) que no hay diferencias significativas entre los estratos (Fig 12). Este resultado fue corroborado, ya que al elaborar la prueba de grupos homogéneos, solo se obtuvo un solo grupo (Cuadro 14).

Cuadro 10. Propiedades químicas del suelo.

Pozo edafol.	Profundidad (cm)	No. muestra	Poblado	Temp.* (° C)	pH	C.E. (ds/m)	As (mg kg ⁻¹)
	0 - 15	1 y 2	San Antonio	22.1	7.81	2.03	14.69
1	15 - 30	3 y 4	San Antonio	22	7.81	2.05	16.12
	30 - 45	5 y 6	San Antonio	22.1	7.80	2.05	19.34
	0 - 15	7 y 8	San Antonio	22.4	7.22	2.21	12.39
2	15 - 30	9 y 10	San Antonio	22.4	7.20	2.22	8.50
	30 - 45	11 y 12	San Antonio	22.4	7.23	2.22	4.22
	0 - 15	13 y 14	San Antonio	23	6.90	2.06	19.93
3	15 - 30	15 y 16	San Antonio	23.4	6.91	2.07	20.86
	30 - 45	17 y 18	San Antonio	23.4	6.91	2.07	18.17
	0 - 15	19 y 20	San Antonio	22	7.80	3.33	16.46
4	15 - 30	21 y 22	San Antonio	22.4	7.81	3.36	13.08
	30 - 45	23 y 24	San Antonio	22.5	7.83	3.33	14.94
	0 - 15	25 y 26	San Antonio	22.2	7.91	2.15	13.83
5	15 - 30	27 y 28	San Antonio	22.3	7.85	2.05	8.51
	30 - 45	29 y 30	San Antonio	22.3	7.93	2.05	5.54
	0 - 15	31 y 32	San Antonio	23.4	7.17	2.03	5.60
6	15 - 30	33 y 34	San Antonio	23.5	7.17	2.07	5.78
	30 - 45	35 y 36	San Antonio	23.6	7.20	2.07	6.40
	0 - 15	37 y 38	El Triunfo	21.4	7.22	1.41	7.08
7	15 - 30	39 y 40	El Triunfo	21.4	7.22	1.44	9.94
	30 - 45	41 y 42	El Triunfo	21.4	7.22	1.41	8.00
	0 - 15	43 y 44	El Triunfo	21.2	7.24	1.6	8.02
8	15 - 30	45 y 46	El Triunfo	21.2	7.24	1.6	11.18
	30 - 45	47 y 48	El Triunfo	21.0	7.24	1.61	7.40
	0 - 15	49 y 50	El Comitan	22	7.16	2.2	0.58
9	15 - 30	51 y 52	El Comitan	22.1	7.16	2.2	0.49
	30 - 45	53 y 54	El Comitan	22	7.14	2	0.55

Donde: *Temperatura del extracto del suelo a la que se tomo el pH del suelo.

Cuadro 11. Medias de la fracción biodisponible de arsénico por pozo edafológico

Pozo Edafológico	Poblado	Ubicación	Media de la Fracción Biodisponible de As (mg kg ⁻¹)
1	San Antonio	23° 47' 47 N110° 03' 20 w	15.77
2	San Antonio	23° 47' 14 N110° 03' 20 w	11.41
3	San Antonio	23° 47' 11 N110° 03" 27w	17.31
4	San Antonio	23° 47' 11 N110° 03' 20w	14.82
5	San Antonio	23° 48' 50 N110° 03' 10w	9.84
6 Promedio San Antonio	San Antonio	23° 48' 51 N110° 03' 10w	6.02 X = 12.46
7	El Triunfo	23° 48' 02 N110° 06' 22 w	8.34
8 Promedio El Triunfo	El Triunfo	23° 48' 03 N110° 06" 22w	9.03 X = 8.68
9 Promedio El Comitán	El Comitán	24° 08' 10 N110° 26' 30 W	0.46 X = 0.46

Cuadro 12. Análisis de Grupos Homogéneos (LSD) para las diferencias entre la fracción biodisponible de arsénico por pozo edafológico.

Poblado	Pozo	Media*
El Comitán	9	.46 a
San Antonio	6	5.93 b
El Triunfo	7	8.93 b
San Antonio	2	8.37 b
El Triunfo	8	9.03 b
San Antonio	5	9.29 b
San Antonio	4	14.82 c
San Antonio	1	16.72 cd
San Antonio	3	19.65 d

*Medias con distinta letra se consideran estadísticamente diferentes (P<0.05)

Cuadro 13. Análisis de Grupos Homogeneos (LSD) para la diferencias entre la fracción biodisponible de arsénico por poblados.

Poblado	Media*
San Antonio	12.46 c
El Triunfo	8.68 b
El Comitán	.46 a

*Medias con distinta letra se consideran estadísticamente diferentes ($P < 0.05$).

Cuadro 14. Análisis de Grupos Homogeneos (LSD) para la diferencias entre la fracción biodisponible de arsénico por profundidades.

Estrato (cm)	Media*
0 - 15	10.95 a
15 - 30	10.47 a
30 - 45	9.44 a

*Medias con distinta letra se consideran estadísticamente diferentes ($P < 0.05$).

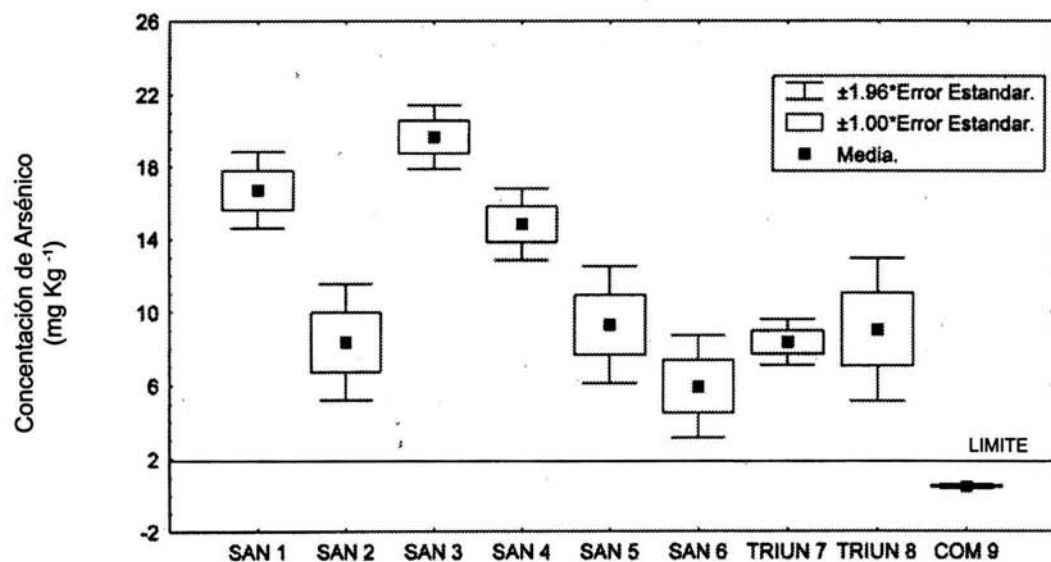


Figura. 10 Promedio de la fracción biodisponible de arsénico por perfil edafológico, (Donde n para cada perfil es igual a 6)

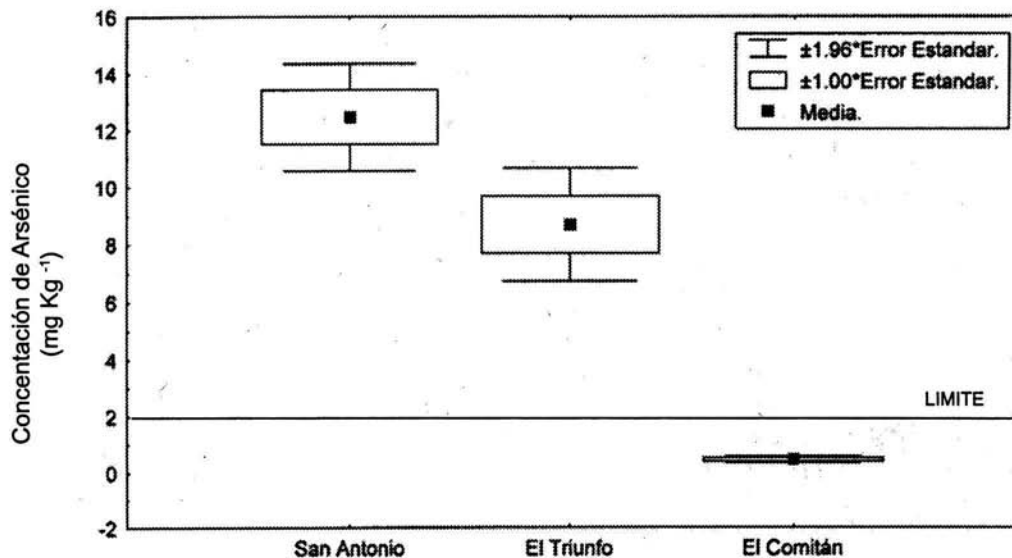


Figura. 11 Promedio de la fracción biodisponible de arsénico en el suelo por población, (San Antonio n=36, El Triunfo n=12, El Comitán n=6).

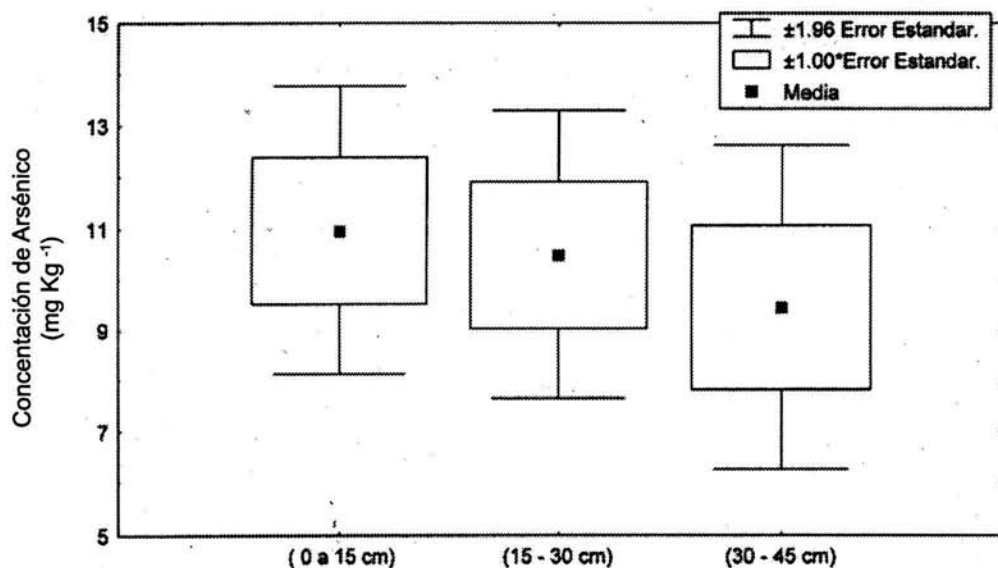


Figura. 12 Promedio de la fracción biodisponible de arsénico a diferentes profundidades (Donde n es igual a 27 para cada profundidad)

6.3 Vegetación.

6.3.1. Diferencias en la concentración de arsénico por poblado.

Los resultados de las concentraciones de arsénico por poblado presente en las tres especies forrajeras en estudio vinorama (*Acacia peninsularis*), mezquite (*Prosopis articulata*) y palo verde (*Cercidium floridium*), nos indican que para el poblado de El Triunfo existe una cantidad mayor de arsénico que para los poblados de San Antonio y El Comitán. Realizando un análisis de las medias de la concentración de arsénico por poblados, encontramos que existe una diferencia entre el poblado de El Triunfo (10.57 mg kg⁻¹), cuyo valor de su media es mayor que la de San Antonio (6.05 mg kg⁻¹) y la media de El Comitán (0.90 mg kg⁻¹) (Cuadro 15). En el análisis estadístico se obtuvo ($F_{(2,96)} = 4,54; P < .0131$), que nos indicó que efectivamente existieron diferencias significativas entre los poblados (Fig. 13).

Posteriormente, se elaboró un análisis de grupos homogéneos (LSD), donde se corroboró la existencia de estas diferencias, obteniendo el grupo de valor mínimo (grupo "a"), correspondiente al poblado de El Comitán, el poblado de San Antonio presentó un valor intermedio y el poblado de El Triunfo presentó el valor máximo (grupo "b") (Cuadro 16).

6.3.2 Diferencias entre las concentraciones de arsénico por estructura vegetativa.

Los valores obtenidos en el laboratorio sobre la concentración de arsénico presente en cada estructura vegetativa en estudio (tallo, hoja y fruto) de las tres especies forrajeras

Mezquite (*Prosopis articulata*), Palo Verde (*Cercidium floridium*) y Vinorama (*Acacia peninsularis*) (Cuadro 17), nos indicaron que para los tallos el valor máximo fue de 8.41 mg kg⁻¹ y como mínimo fue de 0.95 mg kg⁻¹. En el caso de las hojas el valor máximo registrado fue de 42.73 mg kg⁻¹ y como mínimo 0.92 mg kg⁻¹. De igual forma para los frutos se obtuvo que el valor máximo fue de 6.28 mg kg⁻¹, registrando un mínimo de 0.86 mg kg⁻¹.

Como valores de las medias obtenidas de cada estructura encontramos que la media

mayor se presentó en las hojas con un valor de 12.60 mg kg^{-1} . , siguiéndole de manera decreciente, los tallos con una media de 4.87 mg kg^{-1} .y como media mínima los frutos con un valor de 2.16 mg kg^{-1} .

A los valores obtenidos de las diferencias entre la concentración de arsénico por estructura vegetativa, se les aplicaron los análisis estadísticos obteniendo ($F_{(2,96)} = 16.85$; $P < 0.0001$), encontrando diferencias significativas entre las estructuras.

Al elaborar el análisis de grupos homogéneos (LSD) de estos datos, nos mostró que efectivamente si existieron diferencias significativas entre los valores obtenidos para cada una de las estructuras vegetativas (Cuadro 17), encontrando que las hojas presentan el valor máximo de la concentración de arsénico (grupo "b"), siendo éste estadísticamente significativo en comparación con las otras dos estructuras vegetativas (tallos y frutos), obteniendo que los tallos registran un valor intermedio en comparación con los frutos que presentan el valor mínimo (grupo "a") (Fig. 14).

Cuadro 15. Concentraciones de arsénico presente en estructuras vegetativas, medias de las estructuras y medias por poblados.

Muestra	Pozo	Especie	Localidad	As Tallos (mg kg ⁻¹)	As Hojas (mg kg ⁻¹)	As Frutos (mg kg ⁻¹)	Medias por Poblado (mg kg ⁻¹)	
1	1	Mezquite	SAN	4.75	5.41	—	X = 6.05	
2	1	P. Verde	SAN	7.25	—	2.48		
3	1	Mezquite	SAN	6.57	12.40	—		
4	1	Mezquite	SAN	6.23	19.16	2.74		
5	1	Vinorama	SAN	2.90	30.26	2.40		
6	1	Mezquite	SAN	3.29	1.57	3.56		
7	1	Vinorama	SAN	2.72	8.38	2.55		
8	1	P. Verde	SAN	7.77	32.98	3.55		
9	2	Vinorama	SAN	3.01	6.85	1.45		
10	2	Mezquite	SAN	5.26	4.45	2.61		
11	2	P. Verde	SAN	5.76	8.74	2.51		
12	3	Mezquite	SAN	5.98	7.31	2.23		
13	3	Vinorama	SAN	5.46	27.44	—		
14	3	P. Verde	SAN	6.25	19.77	3.25		
15	4	P. Verde	SAN	4.53	—	—		
16	4	Mezquite	SAN	8.41	10.58	—		
17	4	Vinorama	SAN	3.36	23.78	0.67		
18	5	Vinorama	SAN	3.11	1.45	3.48		
19	5	Mezquite	SAN	7.12	0.92	—		
20	5	P. Verde	SAN	6.30	11.71	2.39		
21	6	Mezquite	SAN	5.97	1.31	—		
22	6	P. Verde	SAN	5.61	1.35	2.18		
23	6	Vinorama	SAN	5.74	17.89	2.60		
						San Antonio		
24	7	Mezquite	TRIUN	2.93	0.00	—	X = 10.57	
25	7	Vinorama	TRIUN	3.96	27.74	1.49		
26	7	Mezquite	TRIUN	4.81	16.30	—		
27	7	Vinorama	TRIUN	4.12	33.37	3.18		
28	8	Mezquite	TRIUN	7.24	36.83	11.36		
29	8	Vinorama	TRIUN	5.15	1.19	5.52		
30	8	P. Verde	TRIUN	7.82	42.73	6.28		
						El Triunfo		
31	9	Mezquite	COM	1.10	2.16	1.05		X = 0.90
32	9	Mezquite	COM	0.95	0.92	0.86		
33	9	Mezquite	COM	0.95	0.92	0.86		
				Medias por Estructura	X= 4.87	X= 12.60	X= 2.16	
						El Comitán		

Donde: — = ausencia de la estructura durante el muestreo.

Cuadro 16. Análisis de Grupos Homogéneos (LSD) para la diferencias entre las concentraciones de arsénico en la vegetación de San Antonio, El Triunfo y El Comitán.

Poblado	Media*
San Antonio	6.05 a b
El Triunfo	10.57 b
El Comitán	.90 a

*Medias con distinta letra se consideran estadísticamente diferentes ($P < 0.05$).

Cuadro 17. Análisis de Grupos Homogéneos (LSD) para la diferencias entre las concentraciones de arsénico por estructura vegetativa.

Estructura	Media*
Tallo	4.87 a
Hoja	12.60 b
Fruto	2.16 a

*Medias con distinta letra se consideran estadísticamente diferentes ($P < 0.05$).

6.3.3. Diferencias entre la concentración de arsénico por especie.

Los resultados generales obtenidos en el laboratorio para las tres especies forrajeras, Mezquite (*Prosopis articulata*), Vinorama (*Acacia peninsularis*) y Palo Verde (*Cercidium floridum*), nos indican que Palo Verde presentó la mayor concentración de arsénico con un valor de 42.73 mg kg^{-1} , mientras que el Mezquite presentó el valor mínimo de 0.86 mg kg^{-1} . Cabe mencionar que estos valores se tomaron sin tener cuenta la estructura donde se encontraba la concentración antes mencionada (Cuadro 15).

Analizando estos resultados obtenidos mediante el análisis estadístico correspondiente se obtuvo que la media máxima fue para la especie de Palo Verde con un valor de 8.31 mg kg^{-1} , siguiéndole de manera decreciente el valor de la media de Vinorama con 8.04 mg kg^{-1} . Por último con una media mínima se obtuvo al Mezquite con un valor de 4.68 mg kg^{-1} (Cuadro 18).

Al elaborar el análisis estadístico correspondiente de las diferencias entre especie se encontró ($F_{(2,96)} = 2.00$; $p < .1408$), lo que nos indicó que no existen diferencias significativas

entre las tres especies en estudio, generando un solo grupo en el análisis de grupos homogéneos (LSD) (Fig. 15, Cuadro 18)

Cuadro 18. Análisis de Grupos Homogeneos (LSD) para la diferencias entre las concentraciones de arsénico por especie.

Especie	Media*
Mezquite	4.68 a
Vinorama	8.04 a
Palo Verde	8.31 a

*Medias con distinta letra se consideran estadísticamente diferentes ($P < 0.05$)

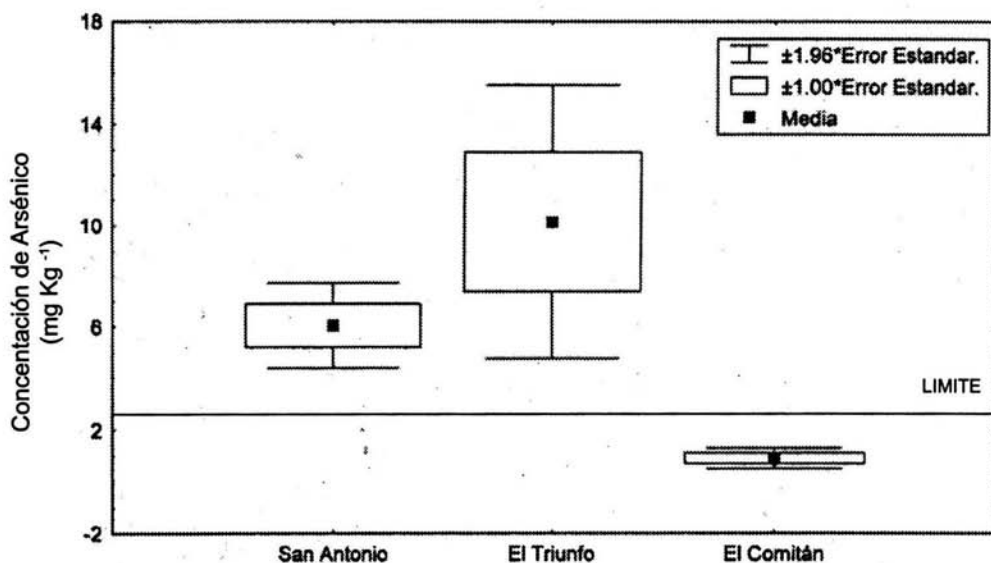


Figura. 13 Promedio de la concentración de arsénico por poblado (San Antonio n=56, El Triunfo n=21, El Comitán n=9)

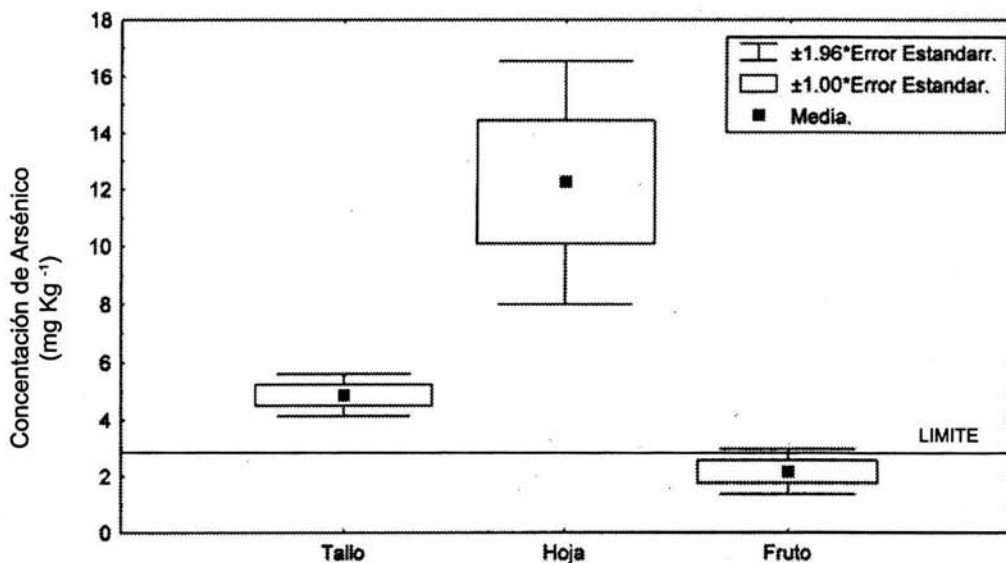


Figura. 13 Promedio de la concentración de arsénico estructura vegetativa (Tallo n=33, Hojas n=30, Frutos n=23)

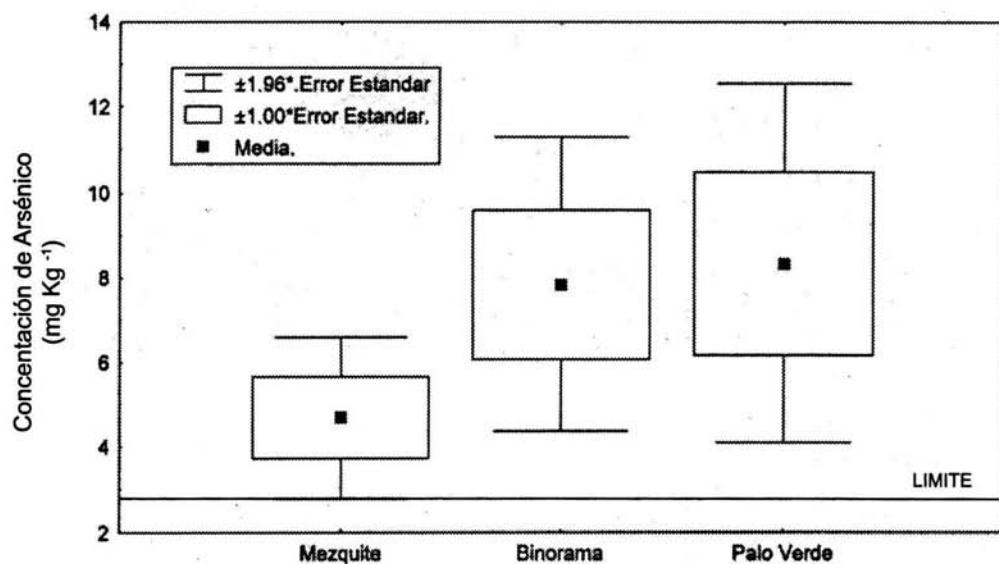


Figura. 13 Promedio de la concentración de arsénico por especie vegetal (Mezquite n=36, Binorama n=30, Palo Verde n=20)

7. DISCUSION

7.1. Agua.

Estudios realizados por Carrillo (1996) y Martínez (1997), indican que la existencia de aporte de arsénico a los pozos de agua del distrito minero depende de diversos factores : distancia entre el material de desecho, tipo de desecho, existencia de lixiviación relacionada con la época de muestreo y geología de la zona entre otros. Al analizar los resultados entre las diferencias de la concentración de arsénico por pozo de agua, se comprobó que todos los pozos del poblado de San Antonio (1 al 6) sobrepasan el límite permisible (0.05 mg L^{-1}), siendo el pozo 6 el de mayor concentración (0.24 mg L^{-1}), ésto se le puede atribuir a que este pozo se encuentra rodeado de jales oxidados con contenido de arsenopirita (FeAsS), la cual es soluble en agua y lixivía al agua subterránea durante la época de lluvia. Otro factor que puede influir es la pendiente del terreno donde se ubica el pozo, debido a que fue el punto más bajo del arroyo San Antonio (362 msnm), con una pendiente del 12%, en donde no existía una cubierta vegetal y las características físicas del suelo como el porcentaje de arena, la porosidad, y la presencia de fallas geológicas (El carrizal y San Juan de los Planes) permitieron la percolación, el acarreamiento e infiltración del arsénico al agua subterránea y a las partes bajas del arroyo. En El Triunfo se presentó el mismo comportamiento siendo el pozo 7 el de mayor concentración (0.09 mg L^{-1}), ubicado a 900m de distancia de la antigua planta de procesamiento El Triunfo a orillas del arroyo "Los Encinitos" y con una altura de 520 msnm y una pendiente del 8 %. De acuerdo con estos mismos autores, el origen de estas concentraciones en su mayoría es del tipo antropogénico, es decir, por las actividades mineras, aunque no podemos menospreciar el aporte geogénico y la contaminación eólica que aunque estos dos últimos no han sido determinados, influyen en la concentraciones de arsénico presentes en el agua. Contrario a estos dos poblados son los resultados obtenidos para el área restringida de El Comitán donde no existe contaminación antropogenica y cuyo valor de arsénico no fue detectable por el método utilizado (0.00 mg L^{-1}).

Además del arsénico se observó que en el pH del agua de los pozos en estudio se presentaron una correlación negativa entre el pH y la concentración de arsénico, es decir, que a pH bajos (5.9, pozo 6 San Antonio) mayor concentración de arsénico (0.24 mg L^{-1}). Existen trabajos relacionando la concentración de arsénico con el pH y el estado redox (Smedley y Kinniburgh 2001, Donahue y Hendry 2003 y Stephen y Blum 2003) que consideran que existe una transformación redox entre el arsenito (AsIII) y el arseniato (AsV), dependiendo del pH y del potencial redox. Encontrando que a pH de 3 a 7 solo se presenta AsIII (arsenito) disminuyendo conforme aumenta el pH hasta un rango de 11, en tanto que el AsV (arsenato) se encuentra presente a pH de 4 a 5, disminuyendo a pH de 5.5 (fig. 2), en donde las condiciones de Redox tienden a cambiar indicando el estado de oxidación y el estado del arsénico en ambos casos (Smedley y Kinniburgh 2001). Comparando los resultados obtenidos del trabajo se encontró que el arsénico presente en el agua analizada es el arsenato (AsV) coincidiendo el pH (5.9) reportado para esta forma de arsénico.

7.2. Suelo.

Los resultados de las propiedades físicas como color y clase textural de los suelos estudiados para el distrito minero SA-ET determinadas para este estudio, coinciden con la clasificación y descripción de colores del material de desecho hecha por Carrillo en 1996. En el caso del suelo la clase textural se encuentra estrechamente relacionada con el porcentaje de saturación, la porosidad, el porcentaje de arena y la densidad aparente de los mismos (Buckman y Brady 1982), incluso el tamaño de las partículas es importante porque de él depende la adsorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos, siendo las arcillas las partículas del suelo con mayor superficie de adsorción (<http://vitrokele.com/soil/soil-chemistry.htm> 1998). Considerando esto, en el presente trabajo se observó que los pozos 6 y 8 de los poblados de San Antonio y El Triunfo respectivamente, presentaron esta característica al tener porcentajes de saturación entre 36.3 y 39 %, clases texturales migajon

arenosa y areno migajosa respectivamente y mostrar colores pardos y rojizos, siendo los tonos rojizos los característico de los suelos que contienen arcillas revestidas con óxidos e hidróxidos de fierro (Munsell 1975, Buckman y Brady 1982). Observando una correlación entre estas tres propiedades físicas del suelo.

En suelos naturales la presencia de arsénico esta relacionada a su naturaleza geológica y a su material parental es decir al tipo de roca del que se originó, encontrándose extensamente distribuido en la corteza de la tierra, al estar presente en 200 especies de minerales (<http://www.librys.com/problemasdequimica/suelo.html> 2003). De acuerdo a lo registrado por Carrillo 1996; Martínez 1997 y Carrillo-Chávez y Drever 2000, existen dos fuentes principales de aportación de arsénico al medio ambiente en el distrito minero de SA-ET . 1) El geológico debido al intemperismo de los minerales sulfurosos de vetas de pirita, calcopirita y arsenopirita que liberan cantidades considerables de arsénico y ácido sulfúrico al agua subterránea de la región y 2) El antropogénico, debido a la actividad minera cuyos desechos presentes en la zona contienen arsenolita (AsO_3). La cual tiene la característica de ser relativamente soluble en agua y al llover se lixivia a través del suelo hasta el agua subterránea, en donde las altas tasas de evaporación presentes en la zona y la topografía (sobre los arroyos San Antonio y los Encinitos para SA y ET, con pendientes de 12% y 8% respectivamente) contribuyen a aumentar la concentración de arsénico en el área de estudio (García 1973; Smedley y Kinniburgh 2002). Además de existir fallas geológicas (La Paz y San Juan de los Planes) que permiten la precolación del arsénico a través del suelo. Encontrando que el AsV es el arsénico predominante en suelos donde el arsénico es de origen geológico como es el caso de este estudio (Carrillo 1996, Smedley y Kinniburgh 2002 ; Donahue y Hendry 2003). Aunque Jiménez de Blas y Rodríguez 1996 han reportado que las reacciones de As en el suelo son altamente gobernadas por su estado de oxidación en donde la existencia de AsIII y AsV predominan en suelos contaminados.

En lo que se refiere a la fracción biodisponible de arsénico por pozos edafológicos se observó que el perfil 3, en su estrato 2 (15 a 30 cm de profundidad) del poblado de San Antonio presentó la mayor concentración (20.86 mg L^{-1}), sobrepasando el límite permisible de fracción biodisponible de arsénico. Por poblado se obtuvo que San Antonio presentó la mayor fracción biodisponible de arsénico y esto se atribuye a la cantidad de arsénico que aporta la planta Los San Juanes y a la actividad artesanal para la extracción de oro que aun existe en este poblado (Carrillo 1996). Si observamos los resultados obtenidos de arsénico biodisponible por estrato podemos darnos cuenta que no existe un gradiente de aumento o disminución por pozo edafológico, presentando valores mayores en el estrato uno o en el dos o menor en el dos o tres, esto puede deberse a que la distribución de este elemento en el pozo edafológico puede estar determinada por las propiedades físicas y químicas del suelo, a la precipitación para cada poblado, al tipo de desecho, al tipo de veta del que proviene y al tiempo que tiene ese desecho a la intemperie. En lo que respecta a la posible contaminación eólica que menciona Martínez (1997) en su trabajo, todavía no se ha comprobado, por lo que hacen falta estudios que comprueben su existencia y la cantidad de arsénico debida a ella.

7.3. Vegetación.

Por los datos obtenidos en el agua y suelo, se esperaba que los valores más altos de la vegetación se dieran en San Antonio, sin embargo, fue el poblado de El Triunfo el de mayor valor, esto se le puede atribuir a que el tiempo que tienen los desechos mineros en este poblado sea mayor, permitiendo una mayor bioacumulación en su vegetación, por la edad de la vegetación analizada (mayor a la de los otros poblados) o por la existencia de mayor aporte de arsénico de origen geológico. Para corroborar estas atribuciones sería necesario la realización de estudios más específicos y detallados. En lo que respecta a las estructuras se obtuvo que las hojas presentaron la mayor concentración, contrario a lo reportado por Wagner *et al.* en 1979, quien estima que las estructuras vegetativas donde

tienden a acumularse son: en las partes comestibles que son las que generalmente acumulan los niveles más bajos de arsénico, la raíz que es donde las altas concentraciones suelen registrarse y las estructuras reproductivas donde se encuentran los niveles intermedios. Lamentablemente para este estudio no se analizaron las raíces debido a que este tipo de vegetación presenta raíces muy profundas, por ser especies que alcanzan los niveles freáticos, como es el caso del Mezquite (*Prosopis articulata*), el cual posee raíces muy profundas por encontrarse distribuido en zonas semiáridas (Virginia y Jarrel 1983). Es necesario mencionar que existen dudas sobre cual sería el nivel máximo de concentración de arsénico en estas especies, si existe esta misma distribución en sus estructuras, si es igual o independiente la distribución de este elemento para cada especie o si existe un comportamiento en particular del mismo, por lo que es imposible deducir si los valores obtenidos son valores altos que puedan causar daños a estas especies. Sirviendo los estudios registrados en plantas como punto de partida para comparar los resultados obtenidos con ellos y dar pauta a nuevos estudios sobre el comportamiento, distribución y afectación del arsénico a estas especies. Al tomar en cuenta los índices y valores registrados podemos comparar los valores obtenidos de manera general encontrando que existen valores que rebasan estos, lo cual nos indica que en cierta forma existen cantidades que pueden ser perjudiciales y que puede consumir el ganado, lo cual es preocupante ya que puede bioacumularse en la carne y leche que son productos consumidos por los pobladores de la zona. En el caso de la vegetación el tipo de arsénico presente es el arsenito (AsIII) (Jiménez de Blas y Rodríguez 1996).

8. CONCLUSIONES.

- 1.- El agua de las localidades en estudio presentan concentraciones arriba del límite establecido (0.05 mg L^{-1}). Lo que nos indica que existe una aportación importante de este elemento debido a la actividad minera de la zona (cercanía o lejanía de los jales con los pozos de agua, antigüedad y origen de los mismos, presencia de vetas con sulfuros metálicos, cercanía de pilas de cianuración, etc.)
- 2.- El tipo de arsénico presente en agua estudiada fue el arsenato (AsV), al presentarse su mayor concentración a un pH ácido (5.9).
- 3.- Factores como la precipitación, la lixiviación, la cercanía de desechos la topografía e incluso la presencia de fallas pueden intervenir en el comportamiento de las concentraciones de arsénico en el agua.
- 4.-El aporte de arsénico de origen antropogénico es importante, al existir una relación entre la concentración de arsénico presente en agua y suelo, con la cercanía de los desechos, tipo de desecho y tiempo que tenga éste a la intemperie.
- 5.-La fracción biodisponible de arsénico en suelos de los poblados de San Antonio y El Triunfo sobre pasa los límites establecidos por la organización panamericana de la salud.
- 5.-Hacen falta estudios más detallados sobre la concentración de arsénico para la vegetación de regiones semiáridas (determinación de la estructura y especies con mayor bioacumulación, etc.)

9. RECOMENDACIONES.

- Elaborar estudios estratificados de los pozos de agua, de recambio de agua y de infiltración de corrientes.
- Elaborar una base de datos que nos permita "predecir" la época de mayor concentración de arsénico en el agua, con el fin de evitar su consumo de los pozos de agua durante las épocas críticas.
- Evitar el cultivo de hortalizas en estos suelos contaminados.
- Evitar que el ganado consuma la vegetación de la zona, suministrando forrajes al ganado y manteniéndolo en corrales.
- Estudiar una posible reubicación de los habitantes de las poblaciones de SA-ET (1000 personas aproximadamente).
- Legalmente: Es necesaria una ley que frene la contaminación del suelo en México, así como el establecimiento de un nuevo límite máximo permisible en el agua bebida en el caso del arsénico, ya que existen diversas organizaciones internacionales que han aceptado que el límite actual de 0.05 mg L^{-1} no es el adecuado para proteger a la salud de la población contra un aumento en la presencia de cáncer, ya que se estima que el riesgo de presentar cáncer puede ser de 13/1,000, cuando se consume cotidianamente agua con valores cercanos a los 0.05 mg L^{-1} .

10. LITERATURA CITADA.

- Agemian.H. and Chau, Y.K. 1976. Manual of Physico-Chemical Analysis of Sediments. Lewis Publishers, Boca Raton, FL. 158 p.
- Albert, L. 1985. Curso Básico de Toxicología Ambiental. 1ª. Edición, Edit. Limusa, México D.F. 311 pp.
- Albert L. 1988. Toxicología Ambiental. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud Limusa. México. 360 p.
- Albores, A., Cebrián. M., Téllez M. y Valdez, B. 1979. Estudio comparativo de hidroarsenismo crónico en dos comunidades rurales de la región lagunera de México. Boletín de la Oficina Sanitaria Panamericana, 196 - 203 pp.
- Andrew, Chang C. and Page, A. L. 1996. Assessment of Ecological and Health Effects of Soil-Borne Trace Elements and Metals. In: Toxicology of Metals. Chapter 2, 29-38 pp.
- Aposhian., H. V. 1989. Toxicology . Rev. Biochem. Chapter 10, 265-299 pp.
- Arriaga, L. y Cancino J. 1992. Prácticas pecuarias y caracterización de especies forrajeras en la Selva Baja Caducifolia. En: Uso y Manejo de los Recursos Naturales en la Sierra de la Laguna. CIBNOR. La Paz, B.C.S. 22 pp.
- Belin, H. E. and Sparck H. M. 1993. Mercury, Arsenic, Anthimony and Selenium contents of sediment from the Kuskokwin River, Bethel, Alaska, USA. Environmental Geology 22:106-110.
- Bejar F., Sosa A. y García L. 1988. Solución al problema del arsénico en la comarca lagunera. Ingeniería Ambiental. Año 1. No. 4. 56 pp.
- Bogorno, J. M., Vincent, P., Venturino, H., and Infante, A. 1987. Environ. Health Perspect., 9, 326-334 pp.
- Briones G. 1982. Factibilidad de la irrigación agrícola con aguas residuales de cervecería. ITESM. Tesis de Maestría.
- Bouyoucos G. J. 1951. Saline irrigation for agricultural and forestry. Dr. W. Junk N.V. Publishers. The Hague. 310 pp.
- Buckman H.O. y Brady N.C. 1982. Naturaleza y propiedades de los suelos. Editorial hispano americana, S.A. de C.V. 590 pp.

- Buck Scientific. Inc.1992. Optional procedures for Flame Operation (for the BUCK 200A Atomic Absorption System) In : 200A Quick-Guide for general Instrumental settings. (203) 853 pp.
- Cancino, J., F. Salinas, Maya Y., Coria R., León J.L., Rodríguez R., Aguilar R. y Arriaga L.. 1994. Contexto Local. En: Estrategia para la Conservación de La Sierra de la Laguna. Publicación No.6. CIBNOR- WWF. La Paz, B.C.S. 137 pp.
- Carrillo, A. 1996. Environmental Geochemistry of the San Antonio-El Triunfo minig area, Southernmost Baja California Peninsula, Mexico. Doctor of Phylosophy in Geology. Laramie, Wyoming 130 p.
- Carrillo, A. and Huyck H. 1997. A genetic model for the Los Uvares gold deposit, Baja California Sur, Mexico. Geofísica Internacional. Vol 36 (2):111-119.
- Carrillo, A. and Drever I.J. 1998. Environmental assessment of the potential for arsenic leaching into groundwater from mine wastes in Baja California Sur, Mexico. Geofísica Internacional Vol 37 (1):35-39.
- Carrillo-Chavez, A. Drever I.J. 2000. Arsenic content and groundwater geochemistry of the San Antonio-El Triunfo, Carrizal and Los Planes Aquifers in Southern most Baja California, México. Environmental Geology 39(11):1295-1303.
- Cebrián, M. y Albores A. 1998. Riesgos para la salud por la exposición a arsénico. La Jornada Ecológica. No. 64. Periódico La Jornada. Pág. 6 y 7. Lunes 23 de Febrero de 1998.
- Cebrián, M. E., Albores A. and Blakely M. 1983. Toxicology of the arsenic. Toxicology. 2, 121-133.
- Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur. Manifestación de Impacto Ambiental en su Modalidad General en la Beneficiadora de Minerales Arroyo Hondo S.A. de C.V. División de Biología Terrestre. 81 p.
- Chaillou G., Shafer J., Ancshutz P., Lavaux G. and Blanc G. 2003. The behaviour of arsenic in muddy or the bay of Biscay (France). Acta. Vol. 67(16) 2993-3003.
- Chakraboty, A. K, and Saha, K.C. 1987. Heavy metal contamination in the human, Indian J. Med. Res. 85: 326-334 pp.
- Chapman, H. y Parket F. 1991. Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas. Ed. Trillas. 130 pp.
- Contin A. 1984. Investigación de Suelos. Métodos de laboratorio y procedimientos para recoger muestras. Ed. Trillas. Tercera reimpresión 90 pp.

- Cortés F., Sosa A. y García L. 1998. Solución al problema del arsénico en la Comarca Lagunera. En: Ingeniería Ambiental. Año 1. Vol. 4. 11-16 pp.
- Dazo, L.M., M.A. Arellano and M. E. Cebrían 1990. The Oxidation States of Arsenic in Well-Water from a Chronic Arsenicism Area of Northern México. Environmental Pollution. Departamento de Farmacología y Toxicología. CINVESTAV- IPN. 64 pp.
- DETENAL 1979. Descripción de la leyenda de la Carta Edafológica DETENAL, México, D.F. 104 pp.
- Díaz-Barriga, F. 1996. Ensayo. Residuos Peligrosos en México. Evaluación del Riesgo para la salud. Salud: Pública. México 38:280-291.
- Donahue R. y Hendry M.J. 2003. Geochemistry of arsenic in uranium mine mill tailing, Saskatchewan, Canada. Applied Geochemistry. Vol 18. 1733-1750.
- Enríquez, S. M. 1993. Variabilidad del Hidroarsenicismo en la Región Lagunera. Disertación Doctoral. ITESM. División de Graduados e Investigación. Programa de Graduados en Agricultura Monterrey, 221 pp.
- Environmental Protection Agency (United States). 1986. Health Assessment Document for Inorganic Arsenic. Prepared by the Office of Research and Development, Environmental Criteria and Methodology, Research Triangle Park. N.C.
- Environmental Protection Agency (United States). 1989. Office of Municipal Pollution Control Assessment of needed publicly owned Wastewater treatment facilities in the United States. Washington D.C. 70 pp.
- Escandón, F. 1983. Análisis de los Trabajos Geológicos Mineros Efectuados en el Distrito Minero de San Antonio- El Triunfo, Baja California Sur. Y Evaluación Económica Preliminar: Consejo de Recursos Minerales, inédito.
- Fazal A., T. Kawachi and E. Ichion. 2001. Extend and severity of groundwater arsenic contamination in Bangladesh. Water International, volume 26 Number 3, 370-379.
- Galván, L., Corey, G. 1987 Arsénico, Organización Panamericana de la Salud, Metepec, México, 15 pp.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 2a. Edición. Instituto de Geografía, UNAM. 255 pp.
- García, J. 1991. Cuadernos de investigación, Coordinación General de Estudios de Posgrado, número 4, Universidad Autónoma de Coahuila, 30 pp.

- Golman, M. and Darcre J.C. 1991. Inorganic Arsenic Compounds: Are they Carcinogenic, Mutagenic, Teratogenic?. *Environmental Geochemistry and Health* Vol. 13(4) 179-191 pp.
- González, A. 1995. Información general sobre la existencia de jales y terreros en el distrito El Triunfo-San Antonio, Consejo de Recursos Minerales, inédito, 2 pp.
- Guzmán, L. C., 1995. Descubren eliminadores de contaminantes para la minería. En: *Revista de Investigación y Desarrollo*. Instituto Tecnológico de Durango. Dr. Manuel Meneses. No. 28, Año III, 7 p.
- Hernández J., Escoppinichi R. y León R.A. 1991. Manual operativo del laboratorio de suelo y agua. UABCS. 91 pp.
- Huyck L. 1993. Factors affect in bioability of metals in soil Vol.-5 (17) 120-130.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 1985. Handbook of Parameter Values for the determination of arsenic environmental. Technical Report Series No. 364
- INEGI. 1985. Carta topográfica San Antonio, Escala 1:50 000.
- Ishinishi, N., Yamamoto, A., Hisanaga, A., and Inamasi, T. 1989. *Cancer Lett.* 21, 141-147.
- Jackson M.L. 1982. Análisis químicos de Suelos. Edit. Omega. Barcelona. 622 pp.
- Jiménez, C. 1994. Contaminación por Metales Pesados y Metaloides en Baja California Sur y Sus Costas: Revisión Bibliográfica. Área de Ciencias del Mar, UABCS.
- Jiménez de Blas O. y Rodríguez N. 1996. Determination of total arsenic and selenium in soils and plants by atomic absorption spectrometry with hidride generation and flow injection análisis coupled techniques. *Journal of AOAC International*. Vol. 79 (3).
- Kabata A. And H. Pendias. 2002. Elements of Group V In: Trace elements in soils and plants. Institute of soil science. Pulawy, Poland. 3a. edic. 225-232.
- Knoth, W. 1966. *Arch. Kin. Exp. Dermatolog.* 227: 228-234 pp.
- Larry, P., Hansford T., Shacklette M. and A. A. Case. 1979, Element Concentrations Toxic to Plants, Animals, and Man. *Geological Survivey Bulletin*. United States Government Printg Office, Washington. 77 pp.
- Martínez, A. M. 1997. Contenido de Arsénico en el Agua Subterránea de la Zona Minera de San Antonio, B.C.S., México: Relación con los Yacimientos Minerales y Obras Mineras. Tesis de Licenciatura, Departamento de Geología Marina. U.A.B.C.S. La Paz, B.C.S. 63 pp.

- Mok, M. W. 1988. Arsenic Speciation and Quality of Groundwater in a Lead-Zinc Mine Idaho. Department of Geology and Geological Engineering University of Idaho Moscow U.S.A. Vol 22 No.6 766-774 pp.
- Monroy M., Díaz-Barriga F., Razo I. y Carrizales L. 2002. Evaluación de la contaminación por arsénico y metales pesados (Pb,Cu, Zn) y análisis de riesgo en la salud en Villa de la paz-Matehuala, S.L.P. Instituto de Metalurgia, UASLP. 7pp.
- Munsell, A. 1975. Soil Color Charts, Macbeth a Division of Kollmorgen Corporation, Baltimore, Mayland, 30 pp.
- Naranjo-Pulido, A. y Acosta, B. 1998. Fusión de las técnicas de Arsina-Azul de Molibdeno, de Chapman y Parket (1991) para elaboración de reactivos y captación de arsina, con la de Buck (1992) en el procedimiento, para la determinación de arsénico en agua, plantas y suelo. En proceso.
- National Academy of Sciences (NAS) 1977. Medical and biological effects of environmental pollutants: Arsenic. Washington, D.C.
- Nicolli, B. y Hugo E. 1989. Groundwater Contamination with Arsenic and other trace elements in an area of the pampa province of Cordoba, Argentina. Departamento de Geoquímica y de aplicaciones geológicas de la teleobservacion. Environ. Geol. Water Sci. Vol. 14 No. 1, 3-16.
- Nriagu, J. 1994. Arsenic in the environment, Part. I, Cycle and Characterization, Series in: Advances in Environmental Science and Tecnology. Vol. 26, 430.
- Onishi, P.H. 1969. Arsenic. Handbook of Geochemistry. Ed. by Wadephl, K.H. Springer-Verlag. Vol II(1):33.
- Pacyna, J. M. 1996. Monitoring and Assessment of Metal Contaminants in the Air. In: Toxicology of Metals. Chapter 1, 9 - 27.
- Pérez U. M. 1998. Necesaria, una ley que frene la contaminación del suelo en México. En: Revista La Jornada Ecológica. No. 37. La Jornada Ecológica Martes 27 de Octubre de 1998.
- Peters S.C. y Blum J.D. 2003. The source and transport of arsenic in a bedrock aquifer, New Hampshire, USA. Applied Geochemistry. Vol 18. 1773-1787.
- Pershagen, G., Nordberg, G., and Bjorklund, N.E. 1984. Arsenic. Environ. Res. 34, 227-241.
- Philip, E. 1987. Original Contribution Exposure to Arsenic and Respiratory Cancer a Reanalysis. Journal of Epidemiology Vol. 125 No. 6 :929-933.

- Piispanen, R. 1991. Correlation of cancer incidence with groundwater geochemistry In northern Finland. *Environmental Geochemistry and Health*. University of Oulu, Linnanmaa, Oulu Finland. Vol 13(2), 66-69.
- PROFEPA 1993. Problemática del suministro de agua, a los poblados de San Antonio y El Triunfo, Informe Técnico, inédito, 20.
- PROFEPA 1994. Estudio Cuantitativo y Cualitativo de Metales Pesados en Muestra de Suelo del Estado de Baja California Sur, Informe Técnico, inédito, 4 pp.
- Robertson, F. 1989. Arsenic in Ground-Water under Oxidizing Conditions, South West United States. *Environmental Geochemistry Health* Vol. 11 No. 364 171-185 pp.
- Sabbioni, E., M. Fischbach, G. Pozzi, R. Pietra, M. Gallorini y J.L. Pitte. 1991. Cellular retention, toxicity and carcinogenetic potential of seafood for the arsenic pollution Vol. 1. 223-250.
- Sánchez, E. M. y García G, 1993 El Problema del Hidroarsenicismo en la Región Lagunera. *Calidad Ambiental*, 7- 10 pp.
- Smedley P.L. y Kinniburgh D.G. 2002. A review or the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*. Vol. 17. 517-568.
- Stephen C.P. y Blum J. D. 2003. The source and transport of arsenic in a bedrock aquifer, New Hampshire, USA. *Applied Geochemistry* Vol. 18 1773-1787.
- Sokal, B.R., and Rohlf, F.J. 1969. *Biometry*. Freeman publication., San Francisco, 599 pp.
- S.P.P. 1979. Carta Edafológica. 1: 1 000 000. La Paz.
- Statistica. 1995. *Statistica for Windows user's guide*, version 5.0, 2nd., vols. 1 and 2. StatSoft, Inc., Tulsa, OK.
- TEOREMA 1997. Proponen NOM para la remediación de los Suelos Contaminados. En: *Revista Teorema. Suelos*. Junio. 45 p.
- Troyo-Diéguez, E. Lachica-Bonilla, F. y Fernández-Zayas J.L. 1990. A simple aridity equation for agricultural purposes in marginal zones. *Journal In Dry Environmental* No. 19 353-362.
- Trude, V. y V. King 1995. Environmental considerations of active and abandonend mine lands. Lessons from Summitville, Colorado. U.S. Geological Survey Bulletin. 222 pp.
- Tseng, W. P., Chu, H. M., How, S. W., Fong, J. M. Lin, C.S. and Yen S. J. 1968. *J. Natl. Cancer Inst.*, 40, 453-463.

- Tseng, W. P. 1977. Environ. Health Perspect., 19, 109-119..
- Unda, F. 1994. Ingeniería aplicada a Saneamiento y Salud Pública. Editorial Limusa, México, D.
- Van Loon, J. C. 1985. Selected Methods of Trace Metal Analysis. Biological and Environmental Samples. Chemical Analysis. Vol. 80 357 pp.
- Vázquez, F., L. Guevara, D. Baz, J.L. Manzano A. Díaz J.J. Fuentes, F. Castillo y H. Valdez. 1993 Técnicas de Análisis de Parámetros Físicoquímicos. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. C.U. 376 pp.
- Virginia, R., y Jarrel, W. 1983. Soil properties in a mesquite-dominated Sonoran Desert ecosystems. Soil Science Society of America Journal. 47, 138 - 144.
- Wagner, S.L., J.S. Mallner, W.E. Morton y R.S. Braman 1979. Skin cancer and arsenical intoxication from well water. Arcj. Dermatol. 115: 1205 – 1207.
- Wang, Z. y Rossman G. 1996. The Carcinogenicity of Arsenic. In: Toxicology of Metals, Chapter 13, 221- 229 pp.
- Zaldívar, R., 1974. Carcinogen potencial of arsenic. Beitr. Pathol., 151, 384-400 pp.-